

T.C
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PASLANMAZ ÇELİK ELYAF TAKVİYELİ ALÜMİNYUM
KOMPOZİTLERDE YORULMA ÇATLAK İLERLEMESİ

VOLKAN ESKİZEYBEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

KONYA, 2006

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Paslanmaz Çelik Elyaf Takviyeli Alüminyum Kompozitlerde Yorulma :Çatlak İlerlemesi

Volkan ESKİZEYBEK

Selçuk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet AVCI

2006, 149 Sayfa

Juri: Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK

Yrd. Doç Dr. Behçet DAĞHAN

Bu çalışmada, paslanmaz çelik/alüminyum merkez çatlaklı levhaların yorulma davranışı ve kırılma parametreleri deneysel olarak incelendi. Kompozit malzeme, 2024 Al levhaların tek yönlü ve sürekli formda AISI 302 paslanmaz çelik teller ile takviye edilmesiyle sıcak pres yöntemi kullanılarak üretildi. Daha sonra ASTM E-647 standartlarına uygun olarak numuneler hazırlandı ve bu numuneler üzerine $a/w=0.4$ oranında merkez çatlaklı farklı açılarda ($0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$) açılarak yorulma yükü etkisi altında kırılma davranışı incelendi. Deneyler sırasında yorulma çatlak başlangıcı, yorulma çatlak büyüme hızı (da/dN), çatlak ağzı açılma miktarı, gerilme şiddet faktörleri ve enerji boşalma hızı araştırıldı. Çatlak büyüme hızı ve çatlak ağzı açılma miktarı çatlak geometrisi ile ilgili bir hasar parametresi olarak kullanıldı. Sonuçlarda, çatlak büyüme hızı; çevrimsel gerilim şiddet faktörü (ΔK) ve enerji boşalma miktarı (ΔG) ile kontrol edilmiştir. Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) ve Elasto-Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) ile bulunan sonuçlar karşılaştırıldı.

Anahtar Kelimeler: alüminyum matrisli kompozitler, merkez çatlaklı, düşük çevrimli yorulma, çatlak ağzı açılma miktarı

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

**Fatigue Crack Growth of Stainless Steel Fiber Reinforced Aluminium
Composites**

Volkan ESKİZEYBEK

Selcuk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Avcı

2006, 149 Page

Jury: Prof. Dr. Ahmet AVCI

Prof. Dr. Kemal ALTINIŞIK

Asst. Prof. Dr. Behçet DAĞHAN

In this study, fracture behaviour of stainless steel/Aluminium laminated composites that with middle through thickness crack under fatigue loading, was investigated. The composite material was produced by using diffusion bonding, which have unidirectional continuous AISI 302 stainless steel as fibers and Al 2024 as matrix. The fatigue tests were conducted using Middle-Tension, M(T), specimens with a thickness of 3 mm, in agreement with the ASTM E647 standard. The effects of crack inclination angels middle through thickness on fracture toughness of the composite material under fatigue testing were observed. The crack initiation, fatigue crack growth rate (da/dN) stress intensity factors, crack mouth opening displacement and fracture toughness are discussed during this study. The crack-growth are determined related to crack orientations.

Keywords: Aluminium matrix composites, center crack, low cycle-high strain fatigue, crack mouth opening displacement

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın tamamlanmasında her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen Tez Danışmanım Prof. Dr. Ahmet Avcı' ya, çalışmamın her aşamasında bana ışık olan Prof. Dr. Ahmet Akdemir ve Yrd. Doç. Dr. Ö. Sinan Şahin' e sonsuz minnet ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, bu çalışmalarım süresince büyük bir sabırla bana destek olan, aileme ve Tülay Tekin'e sonsuz teşekkür ederim.

KISALTMALAR ve SEMBOLLER

ASTM	American Society for Testing and Materials
COD	Çatlak Açılma Miktarı
CTOD	Çatlak Ucu Açılma Miktarı
EPKM	Elasto-Plastik Kırılma Mekanîği
LEKM	Lineer Elastik Kırılma Mekanîği
GŞF	Gerilme Şiddet Faktörü
MMC	Metal Matrisli Kompozit
M(T)	Merkez Çatlaklı Çekme Numunesi
PAN	Poliakrilonitril
a_0	Başlangıç Çatlak Boyu
B	Malzeme kalınlığı
C	Kompliyans
da/dN	Çatlağın ilerleme hızı
E	Elastisite modülü
E_1	Fiber yönündeki Elastisite modülü
E_2	Fibere dik yöndeki Elastisite modülü
G	Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı
G_C	Kritik gerilme şiddet faktörü
ΔG	Şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı değişimi
ΔG_I	Mod I şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı değişimi
ΔG_{II}	Mod II şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı değişimi
G_{12}	Kayma Modülü
K	Gerilme şiddet faktörü
K_C	Kritik gerilme şiddet faktörü
ΔK	Gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
$\Delta K_{eş}$	Eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarı

K_I	Mod I gerilme şiddet faktörü
ΔK_I	Mod I gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
$\Delta K_{I_{eş}}$	Mod I eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
K_{II}	Mod II gerilme şiddet faktörü
ΔK_{II}	Mod II gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
$\Delta K_{II_{eş}}$	Mod II eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarı
K_{III}	Mod III gerilme şiddet faktörü
L	Numune uzunluğu
N	Çevrim sayısı
P	Uygulanan yük
P_{max}	Maksimum Kuvvet
P_{min}	Minimum Kuvvet
ΔP	Kuvvet Değişimi
R	Yorulma yük oranı
U	Elastik şekil değiştirme enerjisi
U^I	Kalıcı şekil değişimi
u	Deplasman
W	Cisme dışarıdan verilen iş
w	Genişlik
σ_n	Nominal gerilme
σ_{max}	Maksimum gerilme
σ_{min}	Minimum gerilme
σ_m	Ortalama gerilme
σ_a	Gerilme genliği
σ_{AK}	Akma Gerilmesi
σ_u	Çekme Gerilmesi
σ_{xx}	x yönündeki eksenel gerilme bileşeni
σ_{yy}	y yönündeki eksenel gerilme bileşeni

σ_{zz}	z yönündeki eksenel gerilme bileşeni
ρ	yoğunluk
τ	Kayma gerilmesi
ν	Poisson oranı

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
SEMBOLLER VE KISALTMALAR	vi
İÇİNDEKİLER	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. KOMPOZİT MALZEMELER	16
3.1. KOMPOZİT MALZEMELERE GİRİŞ	16
3.2.KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI	17
3.2.1. Fiber Takviyeli Kompozitler	18
3.2.2. Tabakalı Kompozitler	19
3.2.3. Parçacıklı Kompozitler	20
3.3.METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLER	20
3.3.1 Metal Matrisler ve alaşımlar	20
3.3.2 Metal matrisli kompozitlerde takviye elemanları	22
3.3.3 Matris Malzemeleri ve Önemli Kompozitler	22
3.3.4 Metal Matrisli Kompozitlerin Karakteristiği ve Dizayn Parametreleri	24
3.3.5. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	26
4.YORULMA	28
4.1. YORULMA DENEYLERİ	29
4.2. TEKRARLI YÜKLEMELER VE GERİLME TİPLERİ	30
4.3. YORULMA (S/N) GRAFİĞİ	32
4.4. KOMPOZİT MALZEMELERDE YORULMA	33
4.4.1. Kompozit Malzemelerde Yorulmayı Etkileyen Faktörler	35
4.4.2.Kompozit Malzemelerde Yorulma Olayının ve Çatlağın Gelişimi	37
4.4.3.Yorulma Çatlak Başlaması	38
4.4.4 Yorulma Çatlak İlerlemesi	38

5.KIRILMA MEKANİĞİ	40
5.1. LİNEER ELASTİK KIRILMA MEKANİĞİ	42
5.1.1 Düzlem Gerilme Ve Düzlem Şekil Değiştirme	46
5.2. ELASTİK-PLASTİK KIRILMA MEKANİĞİ	46
5.3. GERİLME ŞİDDET FAKTÖRÜ DEĞİŞİMİ	47
5.4. ŞEKİL DEĞİŞTİRME ENERJİSİ BOŞALMA MİKTARI	49
6. DENEYLER	53
6.1. DENEY NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI	53
6.2. ÇEKME DENEYİ	56
6.3. YORULMA DENEYLERİ	58
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	61
7.1 GİRİŞ	61
7.2. 0° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi	62
7.3. 0° Açılı Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG 'nin İncelenmesi	65
7.4. 0° Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması	68
7.5. 15° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi	70
7.6. 15° Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG 'nin İncelenmesi	76
7.7. 15° Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması	79
7.8. 30° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi	82
7.9. 30° Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG 'nin İncelenmesi	87
7.10. 30° Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması	90
7.11. 45° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi	93
7.12. 45° çatlaklı numunelerde kompliyans yöntemiyle ΔG 'nin incelenmesi	98
7.13. 45° çatlaklı numunelerde hasar mekanizması	100
7.14. 60° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi	103
7.15. 60° Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG 'nin İncelenmesi	107
7.16. 60° Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması	110
7.17. 75° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi	

	113
7.18. 75° çatlaklı numunelerde kompliyans yöntemiyle ΔG 'nin incelenmesi	118
7.55. 75° Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması	121
7.20. Tüm Çatlaklı Numunelerin Grafiklerinin Kıyaslanması	124
7.20.1 Tüm çatlak açılarında LEKM göre bulunan $(da/dN \sim \Delta K_{es})$ grafikleri'nin kıyaslanması	124
7.20.2. Tüm çatlak açılarında LEKM göre bulunan $(da/dn \sim \Delta G)$ grafikleri'nin kıyaslanması	125
7.20.3. Tüm çatlak açılarında LEKM ve kompliyans yöntemine göre bulunan $(da/dN \sim \Delta G)$ grafikleri'nin kıyaslanması	126
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	128
9. KAYNAKLAR	130
10. EKLER	143

1. GİRİŞ

Bugünkü teknolojide geleneksel malzeme kullanılarak tüm gereksinimler karşılanamamaktadır. Kullanımda malzemeden istenilen en önemli özellikler, dayanım, tokluk, hafiflik ve düşük maliyettir. Özellikle geleneksel malzemelerde aşınma ve darbe dayanımı, kırılma tokluğu ve hafiflik gibi özellikler aynı anda sağlanamamaktadır. Bu amaçla iki veya daha fazla malzemenin istenilen özelliklerin tek bir malzemede elde edilmesi veya yeni bir özellik elde edilmesi ile yeni bir malzeme oluşumu, bugün araştırma konularının büyük bir kısmını oluşturmaktadır. İstenilen özelliklerin pek çoğunu bünyesinde taşıyan bu tür malzemeler kompozit malzemeler olarak adlandırılmaktadır.

Kompozit malzemeler en az iki malzemenin kombinasyonudur ve bu malzemelerden biri takviye elemanı diğeri ise ana (matris) yapı olarak malzemeyi oluşturmaktadırlar. Kompozitte takviye elemanı fiber, elyaf ya da parçacık olarak ana malzemenin içine yerleştirilmektedir. Takviye elemanı ve ana yapı kompozit malzemenin türüne göre metal, seramik veya polimer olabilir. Matris malzeme genellikle tok, sünek ve yumuşak, takviye malzemeleri ise hafif, dayanımı yüksek, yüksek elastiklik ve ergime sıcaklığına sahip olmalıdır. Kompozit malzemeler ileri mühendislik uygulamalarının kullanıldığı günümüzde önemi giderek artmakta ve bu alanda bir çok çalışmalar yapılmaktadır. Takviyenin tipi, şekli ve miktarı ki bunlar değiştirilebilir, matris karakteristiği sayesinde metal matrisli kompozitler çok büyük çeşitliliğe sahiptir. Metal matrisli kompozitlerin en büyük dezavantajları ise yüksek maliyetleridir. Buna rağmen metal matris kompozitlerin günümüz teknolojisinde kullanılması son 30 yıl içerisinde gerçekleşen en büyük gelişmelerden biri olarak kabul edilir. Metal matrisli kompozitler sıradan malzemeler ile kıyaslandığında birçok önemli avantaja sahiptir. Bunlara örnek olarak dayanım/ağırlık oranının yüksek olması, aşınma dayanımlarının yüksek olması, yüksek sıcaklıklarda daha iyi sürünme dayanımı sergilemeleri, yüksek kırılma tokluğu değerleri, mükemmel korozyon dirençleri verilebilir. Fiber takviyeli metal lamine kompozitler yüksek kırılma toklukları nedeniyle yorulma çatlağı ilerlemesine yüksek derecede direnç gösterirler ve bu yüzden uçak gövdelerinde ve kanatlarında kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitler içerisinde şüphesiz ki en çok tercih edilen alüminyum matrisli

kompozitlerdir. Alüminyum matrisli fiber takviyeli kompozitler havacılık, uzay ve otomobil sektöründe geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Bu kompozitler fiber yönünde yüksek dayanım ve rijitlik sergilerken, deneysel elastik modülleri karışım kuralına göre hesaplanan teorik elastik modüllerine yaklaşmaktadır. Sürekli fiber takviyeli metal matrisli kompozitler özellikle son yıllarda yapılan çalışmalar ve dolayısı ile arttırılan özellikleri ile ileri uzay sistemlerinde yüksek bir kullanım potansiyeline sahiptir. Düşük erime noktasına sahip alüminyum matrisli kompozitler tek yönlü takviyelendirilerek bu alanda kullanılabilirler. Ayrıca metal matrisli kompozitler, cam fiber takviyeli plastik kompozitler ile karşılaştırıldığında yüksek sıcaklıklarda çok daha iyi performans sergilemektedir.

Diğer taraftan, sistemlerde veya sistemleri bir araya getiren parçalarda meydana gelen hasarlar genelde benzerdir. Bu hasarların meydana gelmesinin sebeplerinden bir tanesi dizayn parametrelerinin yanlış kullanılmasıdır. Birçok araştırma göstermiştir ki yapılarda meydana gelen hasarların oluşmasını sağlayan malzemede oluşan küçük boyuttaki şekil değişikliklerinin çatlakları başlatması ve bu çatlakların büyüyerek kırılmalara neden olmasıdır. Kırılma prosesi iki kısımda incelenebilir; çatlağın başlaması ve çatlağın yayılması. Bu iki kısım gevrek ve sünek malzemelerde farklı şekillerde ortaya çıkacaktır.

Kırılma mekaniğinin amacı çatlak içeren yapıların ve malzemelerin yük taşıyabilme kapasitelerinin tahmin edilebilmesidir. Bütün dizaynlar ve standart tanımlamalar malzemenin çekme özelliklerinin belirlenmesi için gereklidir, bu bilgilerin hepsi malzemenin servis sırasında kırılmaya gösterdiği doğal direnci bulma içindir. Yüksek miktarda akmanın meydana geldiği veya aşırı sünek kırılma durumları dışındaki kırılma durumlarında çekme ve akma gerilmeleri malzemenin kırılmaya karşı gösterdiği direnci ifade edebilmek için yeterli değildir. Kırılma mekaniği, çatlak içeren ve yük etkisi altındaki bir cisim için çatlak civarındaki gerilme bölgesinin matematiksel olarak ifade edilmesidir. Çatlak civarındaki plastik deformasyon çatlak boyu ile karşılaştırıldığında küçük olduğunda (genellikle yüksek mukavemete sahip malzemeler veya büyük yapılar için geçerlidir) çatlak civarındaki gerilme alanı gerilme şiddet faktörü “K” ile ifade edilir.

Bu çalışmada sıcak presleme yöntemi ile üretilmiş paslanmaz çelik tel takviyeli alüminyum matrisli lamine kompozit üretilmiş, üretilen bu yeni malzeme

ile alüminyum levhaların mekanik özelliklerinin artırılması amaçlanmıştır. Üretilen bu kompozit malzemenin mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca kırılma mekaniği ile ilgili özelliklerden olan ve ortasında çeşitli açılarda boyuna çatlak bulunan malzemenin 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. Ayrıca çatlak ağzı açılma miktarı kullanılarak malzemenin kompliyans yöntemi ile $da/dN-\Delta G$ grafikleri çizilmiş ve lineer elastik kırılma mekaniği kullanılarak bulunan değerler ile karşılaştırılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Chang ve Lin, 500 °C ve 100 MPa vakum altında 10 dk parametrelerini kullanarak Ni kaplanmış 304 paslanmaz çelik teller ile takviye edilmiş alüminyum matrisli kompozitlerde difüzyon kaynağı ile malzeme üretimi gerçekleştirmiştir (Shou-Yi Chang, Su-Jien Lin 1997).

Kesapradist ve ark., difüzyon kaynağı ile ürettiği kompozitlerde nikel film ile alüminyum arasında 500 °C küçük bir arafaz yüzeyinin oluştuğunu gözlemlemiştir (J. Kesapradist ve ark. 1992).

Ataberk ve ark., alüminyum matrisli paslanmaz çelik fiber takviyeli kompozit malzeme üretmişlerdir. Kullanılan paslanmaz çelik 1mm çapında olup numune boyunda hazırlanmıştır. Alüminyum levha olarak kullanılmış kalıba yerleştirilen kompozit malzeme 560 °C de 0.3 MPa basınçta 20 dk tutularak kompozit malzeme difüzyon kaynağı ile üretilmiştir (N. Ataberk ve ark. 2004).

Lee ve ark., difüzyon kaynağının basit bir birleştirme prosesi olduğunu, üç önemli parametre tarafından kontrol edildiğini ve bunların sıcaklık , basınç ve süre olduğunu belirtmiştir. Sıcaklığın ana malzemenin erime sıcaklığının 50-70%'i kadar alınabileceğini belirtmiştir. Ürettiği kompozit malzemenin mikro yapısını incelediğinde birleşmenin difüzyon çizgisi boyunca gerçekleştiğini ve üretim aşamasında uygulanan aşırı basınç nedeniyle birleşme çizgisi boyunca mikro çatlakların oluştuğunu göstermiştir (C.S. Lee ve ark. 1999).

Travessa ve ark., alüminyum oksit ve AISI 304 paslanmaz çeliğinin Ti, Cu ve Mo arafazlarını kullanarak difüzyon kaynağı ile birleştirmiştir. Sonuç olarak kullanılan arafazaalardan titanyumun her iki bileşen ile 20 Mpa lık arafaz dayanımı ortaya koyduğunu belirtmiştir. Aynı deneyler Cu ve Mo için yapıldığında sonuçların başarısız olduğu görülmüştür (D. Travessa ve ark. 2002).

Filho ve ark., paslanmaz çelik 316 l ve ticari alüminyum telleri çelik bir kutu içerisinde fiber demeti oluşturmak için 525 °C sıcaklıkta 100 Mpa basınçta 120 dk sıcak presleme uygulayarak bir araya getirmiştir. Bazı paslanmaz çelik teller A17Si ile kaplanarak kaplamanın mekanik özelliklere etkisi ayrıca incelemiştir. yapılan çekme ve yorulma testleri sonucunda takviye oranının artması ile çekme ve yorulma dayanımının arttığı, kaplanan paslanmaz çelik tellerin kaplanmaya göre daha fazla

uzadığı saptanmıştır. Çalışmadan elde edilen bir diğer sonuç ise seramik takviyeli metal kompozitlerden farklı olarak kırılma sırasında tellerin uzama eğilimi göstererek matrisin zayıf noktalarında matristen sıyrıldığını belirlemiştir (A.L. Filho ve ark. 1998).

Yang ve ark., paslanmaz çelik ve Al matrisli kompozit malzemeyi aktifleştirilmiş yüzey difüzyon kaynağı ile birleştirilmiştir. Birleşen yüzeylerde mikro çatlaklara ve gözenekli yapılara rastlanmamıştır. 10 nm kalınlığındaki arafazda ana bileşen olarak silikon ve çeşitli değerlerde oksijen ve karbon bulunmuştur (L. Yang ve ark. 1997).

Pal, difüzyon kaynağı ile üretilen alüminyum kompozitlerde temiz yüzeylerin iyi bir birleşme için en önemli koşullardan biri olduğunu ve sanayi ortamında bunun sağlanmasının zor olduğunu bildirmiştir (T. K. Pal 2005).

Ramakrishnan, sıcak presleme ve toz metalürjisini birlikte kullanarak yeterli arafaz dayanımı elde edbilmek için basınç, sıcaklık ve zaman parametrelerini optimize etmiştir (P. Ramakrishnan 1984).

Tamayo, sıcak presleme yöntemi ile üretilmiş paslanmaz çelik tel takviyeli alüminyum kompozitlerin sabit yük etkisi altında deformasyon davranışlarını incelemiştir. deneysel sonuçlar ile karışım kuralına göre bulunan mekanik özelliklerin uyum gösterdiğini belirlemiştir. Arafaz dayanımının kalınlığı arttıkça çekme dayanımının ve uzama değerlerinin azaldığını belirtmiştir (P. Tamayo 1977).

Hwang ve ark., yüksek basınçlı vakum ile difüzyon kaynağı ile üretilen paslanmaz çelik AISI 304 takviyeli Al matris kompozitlerde arafazın sabit kalınlıkta ve düzenli olduğunu bildirmiştir (Y. Hwang 1997).

Ganesh ve ark., alüminyum alaşımını matris olarak ve 3 boyutlu kısa fiber takviyeli kompozit malzeme kullanarak malzemenin sıcak haddelenmesinin ardından elastisite modülünün karışım kuralına hesaplanan değerden yüksek çıktığını kanıtlamıştır (V. Ganesh ve ark. 2002).

Sayman ve ark., eğilme momentine maruz bırakılmış çelik fiber takviyeli alüminyum matrisli kompozitlerde elastik-plasitik gerilme dağılımını analitik olarak incelemiştir. Bu çalışmada kompozit malzemenin şekil değiştirme sertleşme parametresini $n=0.625$ olarak bulmuşlardır (O. Sayman ve ark. 2004).

Quan, alüminyum ingotları eriterek içerisine NiAl tozları boşaltarak ürettiği kompozit malzemede yaşlandırma işlemi uygulamış ve çekme testine tabii tutmuştur. Kırılma yüzeylerini incelediğinde matris-fiber ayrılmasını gösteren herhangi bir kanıta rastlamamıştır (Gaofeng Quan 1999).

Hwu ve Derby, lamine kompozitlerde çatlak dallandırıcı ve çatlak durdurucu oryantasyonları için K_{IC} belirlemiştir. Çatlak durdurucu oryantasyonunda, yük deplasman grafiğinde maksimum yük oluşmadan eğride dalgalanmalar meydana geldiğini belirtmiştir. Bu durum çatlağın yumuşak ve sert fazlardaki yeniden çekirdeklenmesine bağlanmıştır. Dalgalanma sırasında oluşan minimum yükler yumuşak fazlarda maksimum yükler ise sert fazlarda oluşmuştur. Çatlak dallandırıcı oryantasyonu için ise, eğride dalgalanma söz konusu değildir ve P_Q değeri daha kolay ölçülebilir (K.L. Hwu, B. Derby 1999).

Chung ve ark., metal/intermetalik lamine kompozitlerde çatlak başlangıç tokluğunu K_C çatlak durdurucu ve çatlak dallandırıcı oryantasyonları durumlarında hesaplamıştır (D.S. Chung ve ark. 2002).

Jeng ve ark., fiber takviyeli kompozitler için kırılma enerjisinin kritik çatlak başlangıç enerjisini ve toplam işi hesaplamışlardır. Bu çalışmada chevron çentikli üç noktadan eğilme numuneleri kullanılmış ve çatlak aynı düzlemde büyümüştür. Yük-deplasman eğrisi ise sabit hızda çekme altında bulunmuştur. Kritik çatlak başlangıç enerjisi yük-deplasman eğrisinde süreksizliğe kadar olan ve eğrinin altında kalan bölge olarak tanımlanmıştır. Kırılma enerjisinin toplam işi ise kırılma prosesi sırasında yutulan enerjiye eşit olduğu ve eğrinin altında kalan alan olduğu kabul edilmiştir (S. M. Jeng ve ark. 1991).

Papanicolaous ve Bakos, G_{IC} terimlerine bağlı kalarak yeni bir yaklaşım ile lamineler arası kırılma tokluğunu ölçmüşlerdir. Bu yaklaşımda, maksimum deplasman δ_{max} , P_{max} 'a bağlı olarak bulunmuştur. $0.1 \delta_{max}$ kadar ötelenmiş ve başlangıç eğimine paralel bir çizgi çizilmiştir. Bu çizginin verdiği P_C değeri kullanılarak G_{IC} hesaplanmıştır (G. C. Papanicolaous ve D. Bakos 1995).

Gudas ve Davis, kompiyans metodu için yapılmış olan round robin test sonuçlarını yorumlamıştır. Bu çalışmada belirttiklerine göre kompiyans metodu ile

ölçülen gerçek çatlak oranının uzunluğu 0.42-2.918 arasında değişmektedir (J. P. Gudas ve D. A. Davis 1982).

Futato ve ark., kompiyans metodunun geçerliliğinin lineerliğe, yük transducer geçerliliğine ve clip gage'e bağlıdır (R. J. Futato ve ark. 1985).

Monaharan ve ark., kompiyans metodunu lamine kompozitlere uygulamışlardır. Strok kontrolü ve $25\mu\text{m}/\text{dk}$ altında yapılan deneylerde deplasman değerleri çatlak ağzına yerleştirilen clip gage'ler sayesinde ölçülmüştür. J-R eğrisi ASTM E813 standardının prosedürlerine uyularak çizilmiştir (M. G. Monaharan ve ark. 1990).

Pandey ve ark., kompakt çekme numuneleri kullanmıştır. COD değerleri, çatlakın üzerine yerleştirilen clip gage ve kullanılan bir formülasyon sayesinde elde edilmiştir (A. B. Pandey ve ark. 2001).

Antolovich ve ark., sürekli takviyeli kompozit malzemelerde takviye oranının etkisini araştırmışlardır. Bu kompozitte kullanılan fiberler kaba martemperlenmiş çeliği ve matris malzemesi de yine martemperlenmiş olup fiberlere göre daha gevreklerdir. Fiberlerin hacimsel oranı $V=0.03$ ten 0.16 ya artırılarak kırılma tokluğu değerleri K_{IC} ve G_{IC} ölçülmüştür. Kompozit malzemenin kırılma tokluğunun sadece matris malzeme ile kıyaslandığında çokta yüksek olmadığı görülmüştür. Ayrıca kırılma tokluğu değerleri en büyük hacimsel oran değerine kadar artış göstermekte ancak bu değerden itibaren azalmaktadır. Kompozit malzeme kararlı bir şekilde kırılana kadar yük-deplasman eğrisi çatlak büyüme direnç eğrisine dönüştürülmüştür. Çatlak ilerleme direncinin hacimsel oranın artmasıyla arttığı görülmüştür. R eğrisi yorumlandığında G_{IC} değerinde dalgalanmalarının olduğu görülmüştür. Çatlak ilerleme direnci fiberlerde meydana gelen plastik deformasyona veya matris ile fiber arasındaki bölgesel ayrılmalara dayandırılmayacağını göstermişlerdir (S. D. Antolovich ve ark. 1971).

Gent ve Wang, polimer kompozitlerde fiber çapının kırılma tokluğu üzerine etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada fiber ile matris arasındaki bağlanma ne kadar iyi olursa olsun fiberin çapı kompozit malzemenin genişliğinin ellide birinden daha küçük olduğunda ara yüzey kırılması meydana gelecektir. Büyük çaplı fiberler için, fiberlerin sıyrılması veya matrisin çatlaması söz konusu olabilir (A. N. Gent ve C. Wang 1992 ve 1993).

Fu ve Lauke, süreksiz fiberler ile takviye edilmiş metal matrisli kompozit bir malzemede fiber sıyırılmasını araştırmıştır. Fiber sıyırılma enerjisi fiberlerin uzunluğunun, fiber dağılımının fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Çalışmanın sonucunda ise yüksek dayanıma sahip bir fiber, yüksek fiber oranı ve fiberlerin boyuna göre büyük çap yüksek sıyırılma enerjisi ortaya çıkarmak için ideal değerlerdir (S. Y. Fu ve B. Lauke 1997).

Xia ve ark., Al_2O_3 ile takviye edilmiş Al (2xxx veya 6xxx) kompozitlerde hacimsel oranın kırılma tokluğu üzerine etkisini Üç noktadan eğilme deney numunesi kullanarak incelemiştir. Yük-deplasman eğrisini kullanarak çatlak açılma kuvvetlerini ve enerji yutma seviyelerini belirlemiştir. 6xxx serisi kompozitlerde çatlak açılma kuvvetini 1180 N ve enerjisini 250 KJ olarak bulmuştur. Bu değerler $V=0.1$ hacimsel oranında elde edilmiştir. Hacimsel oran iki katına çıkarıldığında değerlerin sırası ile %8 ve %53 artmıştır. Görülmüştür ki hacimsel oranın değişiminin çatlak açılma yükü üzerine büyük bir etkisi yoktur (X. Xia ve ark. 2002).

Alüminyumun çelik veya paslanmaz çelik tozlar ile takviyelendirilmesi ile ilgili çalışmalardan, Baron ve ark., takviyenin hacimsel oranında arttırıldığında kırılma tokluğunun azaldığını belirtmiştir. Bu sonuca bakarak matris ile partiküller arasındaki gevrek fazların düşük yüklerde kırılmasına bağlamıştır (P. R. Baron ve ark. 1997).

Bolton ve Gant, sert seramik partiküller ile takviye edilmiş yüksek hız çeliği matrisli kompozitinde kırılma tokluğu üzerinde çalışmıştır. En iyi sonuçlar NbC takviyesinde ortaya çıkmıştır. Hacimsel oranı $V=0.077$ olan bu kompozit için $K_{IC}=25.2 \text{ Mpa.m}^{0.5}$ olarak hesaplamıştır. Bununla birlikte kırılma tokluğunun hacimsel oranın artmasıyla en düşük değerlerine düştüğü belirlenmiştir (J. D. Bolton ve A. J. Gant 1998).

Chen ve Winchell, çelik/çelik lamine kompozitlerde tokluk ve mekanik özellikler hakkında incelemelerde bulunmuşlardır. Lamine kompoziti oluşturan çeliklerden biri sert diğeri yumuşaktır. Bu çalışmada tokluğun sert çeliğin hacimsel oranının artmasıyla azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Buna ek olarak kompozitin tokluğunu ve dayanımını arttırmak için iki gereksinime ihtiyaç vardır. Bunlardan birincisi yumuşak çeliğin bağımsız olarak şekil değiştirebilmesine izin verilmesi ve ikincisi çatlağın iki sert çelik arasındaki yumuşak çelik tabakasının kalınlığını

arttırarak enerjisinin azaltılması olduğunu belirtmiştir (W. Y. C. Chen ve P. G. Winchell 1977).

Oguni ve Ravichandran, en çok kabul gören kabul gören kırılma modeli Tsai ve Wu (1971) ve en son yayınlanan kriter olan Christensen (1997) arasında kullanılan kırılma kriterlerinin geniş bir yelpazede ve farklı yükleme koşullarında kullanıldığını aslında bu modellerin hiçbirinin kompozitlerin dayanımı kontrol eden kırılmanın altında yatan mekanizmaya dayandırılmadığını belirtmiştir. Bazı modellerin geçerliliğinin deneyler ile yapılacak kritik karşılaştırmalara bağlı olduğunu bildirmiştir. Yani başka bir deyişle bazı modellerin analitik ve nümerik olarak kırılma zarflarını tanımlayabileceğini ancak kırılma zarflarının şeklini ve bileşik gerilmeleri kontrol eden olguyu açıklayamayacağını iddia etmiştir (K. Oguni ve G. Ravichandran 2001).

Yüzey çatlaklı numunelerde gerilme şiddet faktörünü (Irwin 1957) hesaplamıştır. Yorulma çatlak ilerleme hızını (Paris ve Erdoğan 1960) hesaplamış ve bunu gerilme şiddet faktörünün bir fonksiyonu olarak tanımlamışlardır.

Newman-Raju, eliptik yüzey çatlağının ilerleme davranışlarını, sonlu kalınlıktaki ve genişlikteki numuneler üzerinde incelemiş, bu konuda ampirik formüller geliştirmişlerdir (Newman-Raju 1976).

Sun, grafit ve camla güçlendirilmiş polimer kompozitlerin üzerlerine 2024-T3 ve 7075-T6 alüminyum alaşımlı levhalar yapıştırılarak yeni bir hibrid kompozit malzeme üretmiştir. Daha sonra bu malzeme üzerinde hasar mekanizması ve akma sınırları araştırılmıştır. Bu çalışmada kalıcı termal gerilmelerin ve hacimsel oranların, akma sınırları ile hasar mekanizmasına olan etkilerini incelemiştir (W. Sun 1997).

Soden ve ark., farklı kırılma kriterlerinin benzerliğini ve farklılıklarını deneysel olarak ortaya koymuştur. Kırılma teoremlerinden Chamis, Hart-Smith, Tsai, Rotem ve Punch teoremlerini iki eksenli yük etkisi altında tekyönlü cam takviyeli epoksi numunelere uygulamıştır (P.D. Soden ve ark. 1998).

Chiang, fiber takviyeli kompozitlerin kırılma tokluğunu tahmininde kullanılmak üzere bir model geliştirmiştir. Malzemenin kırılma direncinin fiber sıyrılma uzunluğu ile ilişkilendirmiştir. Yaptığı analizler sonucunda önce matris fiber ayrılması sonra fiber sıyrılmasının gerçekleştiğini kabul ederek fiber sıyrılma prosesinin çatlak büyüme direncine büyük etkisi olduğunu ortaya koymuştur. Fakat

fiber ile matris ayrılmasının ve fiber sıyrılma prosesinin arayüzey dayanımı yüksek kompozitlerde ve yüksek hızlı yükleme durumlarında ortadan kalkacağını belirtmiştir (Chiang 2000).

Rikards ve ark., tekyönlü cam fiber takviyeli kompozit malzemeye bileşik mod testleri uygulamıştır. Bu testlerde G_I/G_{II} oranının çatlağı ilerleten mekanizmayı karakterize ettiğini belirtmiştir. Ayrıca izotropik malzemelerde 0° - 90° arasındaki çatlak oryantasyonlarında 15° lik artırımlar ile mantıklı bileşik mode sonuçları elde edilebileceğini fakat kompozit malzemelerin arayüzey dayanımı incelenirken daha yüksek mod I ve mod II oranları kullanılması gerektiğini bildirmiştir (R. Rikards ve ark2003).

Archangelska ve Mileiko, metal matris-metal fiber kompozitler için kırılma yeni bir kırılma kriteri ortaya koymuştur. Kritik gerilme şiddet faktörünün hesaplanmasında plastik matris tarafından çevrelenmiş bir fiberde kırılma sırasında uzaması nedeniyle enerji absorbe kapasitesi hesaba katılmıştır. Deney sonuçları alüminyum matris ve çelik fiber takviyeli kompozit malzeme üzerinden alınmış ve modelin geçerliliği kanıtlanmıştır. Malzeme üretiminde difüzyon kaynağı kullanılmıştır. Deneyler sonucunda metal matris-metal fiber kompozitlerdeki arayüzey dayanımındaki büyük değişiklikler kırılma tokluğu değerlerinde dikkate alınacak değişimlere yol açmayabileceğini kanıtlamıştır (I. N. Archangelska ve S. T. Mileiko 1976).

Zhang ve ark., arafaz ayrılması ve sürtünme kayması, fiber sıyrılması ile birleştiğinde tek yönde takviye edilmiş kompozitlerde tokluğu arttıran iki önemli mekanizma olduklarını belirtmiştir. Ayrıca arafazın özelliklerinin artırılması ile kırılma direncinin artırılabilmesine fakat tokluğun fiberlerin kırılması ile sınırlandığını belirtmiştir. Bu sonuç ışığı altında yalnızca optimum arafaz özelliklerinde maksimum tokluğun ortaya çıkacağını bildirmiştir (Xi Zhang ve ark. 2004).

Kim ve ark., genel olarak lamine kompozitlerde kırılmayı kontrol eden parametrenin delaminasyon olduğunu ve lamineler arası dayanımın iyi anlaşılmasının yapısal dizaynlarda ve malzemelerin geliştirilmesinde çok faydalı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca kompozit malzemelerde kırılma tokluğunun çatlak büyüme doğrultusu ve fiber doğrultusu arasındaki açının farklılığına bağlı olduğunu,

bu yüzden arafazı oluşturan düzlemlerdeki fiber yönü ve delaminasyon kırılma tokluğunu inceleyebilmek için kırılma tokluğunu niteliksel olarak farklı açılarda veya fiber yönü ve çatlak büyüme yönü parametreleri arasında incelemenin gerekli olduğunu belirtmiştir. Delaminasyon kırılma tokluğu geniş bileşik mod oranlarında dikkate alınması gerektiğini bildirmiştir (Ben V. Kim ve ark. 2003).

Vassel, SiC takviyeli Ti kompozitler ve karbon takviyeli alüminyum kompozitlerde çalışmış ve arafaz mukavemeti mekanik davranış üzerine etkisi olduğunu, zayıf arafazın ise kırılma tokluğunun ve yorulma direncinin artmasına neden olduğunu belirlemiştir (A. Vassel 1999).

Potti ve ark., üç farklı sürekli fiber takviyeli kompozit malzemede ortalama gerilme kriteri olarak bilinen Whitney-Nuismer kırılma modelini analitik olarak incelemiştir. Bu modelde karakteristik numune boyutları ve eşit çentik uzunlukları kullanılmıştır (P.K. Govindan Potti ve ark. 2000).

Ferreira ve ark., cam fiber takviyeli polipropilen kompozit malzemelerde yorulma davranışına kompozit tasarımın ve yük koşullarının etkisini incelemiştir. Bu çalışmada kompozit malzemede ki fiber olarak kullanılan cam elyaf 0° , $+30^\circ/0^\circ/-30^\circ$, $+45^\circ/0^\circ/-45^\circ$ olmak üzere üç farklı geometride yapılmış ve tabakalanma geometrisinin yorulma dayanımını etkilediği gözlenmiştir. Deneylerde numunelerin farklı sıcaklıklarda ve farklı yük oranlarında yorulma davranışları incelenmiş S/N grafikleri oluşturulmuştur. Sıcaklığa bağlı değişen katılık kaybı, bir hasar parametresi olarak ele alınmış ve bunun sıcaklıkla doğru orantılı olduğu ve yorulma ömrünü etkilediği sonucuna ulaşılmıştır (Ferreira ve ark. 1999).

Yine Ferreira ve ark., 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. Bu çalışmada delik çapı büyüklüğünün ve pozisyonunun yorulma performansını etkilediğini gözlemlemiştir. Ayrıca değişik yükleme şartlarının ve sıcaklık değerlerinin de yorulma ömrünü etkilediğini deneysel sonuçlarıyla beraber rapor etmişlerdir (Ferreira ve ark. 1997).

Czigany and Karger, örgü takviye ile güçlendirilmiş polipropilen kompozitlerde hasar bölgesinin büyüklüğünün yorulma performansına etkilerini incelemiştir (Czigany ve ark. 1993).

Paepegem ve ark, yorulma sonucu tabaka ayrılması olayını incelemiş ve bu olayı sonlu elemanlar analizi ile doğrulamışlardır (Paepegem ve ark. 2001).

Tabakalı cam fiber takviyeli polyester kompozit malzemeler üzerinde sabit genlikte ki yükler altında yorulma olayı Tong tarafından çalışılmıştır. Bu çalışma da çatlak ilerleme safhaları incelenmiş ve matris çatlaması sonucu oluşan ek gerilme dağılımını ve rijitlikte ki azalmayı sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellemiştir. Yorulma sırasında çatlakların, başlangıç, kararlı halde ilerleme ve çatlak etkileşimi olarak üç aşamada geliştiğini gözlemlemiştir (Tong 2002).

Yine D. Stevanović ve ark. cam fiberle takviye edilmiş vinil ester kompozit malzemeler üzerinde, mod I ve mod II delemantasyonuna başlangıç çatlak şartlarının etkisini incelemişler ve yorulma ön çatlağı ile çatlak ilerleme miktarlarının, enerji boşalma miktarına olan etkilerini bileşik mod testleri uygulayarak, sonuçlarını rapor etmişlerdir (D. Stevanović ve ark. 2000).

Shan ve ark., cam ve karbon takviyeli epoksi matris malzemelerin çekme-çekme durumundaki yorulma davranışlarını hem havada hem de 25°C de saf su içinde deneylere tabi tutmuşlardır. Maksimum dayanımın %85'inde yapılan deneylerde, yorulma ömründe belirgin bir değişiklik görülmemiştir. Ancak maksimum dayanımın %65 ve %45'inde yapılan deneylerde yorulma ömrünün azaldığını rapor etmişlerdir (Shan ve ark. 2002).

Yine başka bir çalışmada bileşik mod (mod I ve mod II) uygulanarak, yüksek çevrimli yorulma deneylerinde ki çatlak ilerleme davranışlarını R.K. Nalla ve ark. alüminyum alaşımları üzerinde (Ti6Al-4V) incelemişlerdir. Bu çalışmada özellikle küçük boyuttaki çatlakların etkileri araştırılmış ve sonuçları rapor edilmiştir (R.K. Nalla ve ark. 2002).

Newman ve Haines, “Yorulma çatlak büyüme ölçme testi” olan ASTM E-647 de kullanılan iki farklı numuneyi analitik olarak incelemiştir. Numunelerden biri sürtünme ile yük taşırken diğeri pimler yardımı ile yük taşımaktadır. Boy/genişlik oranı $L/W=1$ olan sürtünme etkisi ile yük taşıyan merkez çatlaklı numunelerde Federsen secant formülü 1% hata ile uygulanabilirken Tada-Federsen eşitliği 0.5% hata ile sonuç verdiğini bulmuşlardır (T.C. Newman ve M. J. Haines 2005).

Fatami ve ark., 14 farklı alüminyum alaşımının yorulma ömrü datalarına iki çizgili (bilinear) log-log modelini uygulamışlardır. Bu model alüminyum alaşımları

için lineer modelden daha uygun sonuçlar vermiştir. Bulunan sonuçlara göre çentikli numunelerde, kısa ömürlerde iki model arasındaki uyum uzun ömürlü deneylere göre daha büyük olduğun, ömür arttıkça modeller arasındaki uyumsuzluğun arttığını belirtmiştir. Bunun nedeninin lineer modelde ekstrapolasyon nedeniyle artan hatalar olduğunu bildirmiştir (A. Fatami ve ark. 2005).

Moser ve ark., yorulma yükü etkisindeki alümina fiber takviyeli alüminyum kompozit malzeme incelemiştir. Fiberlerin yorulma çevrimi sırasında kademeli olarak kırıldığını kırılan fiber sayısının logaritmik çevrim sayısı ile lineer olarak arttığını saptamıştır. Ayrıca monoton yani tekdüze yükleme esnasında fiberlerin de kompozit malzeme gibi yorulma etkisi ile kırıldığını belirlemiştir (B. Moser ve ark. 2005).

Wang ve ark., ısıtıl işlem uygulanmış Al 7075 ve 6061 alaşımlarının uzun yorulma ömrü şartlarında çatlak büyüme davranışlarını incelemiştir. Sonuçlarda yorulma kopmasının 10^7 hatta 10^9 çevrimden sonra gerçekleştiğini belirlemiştir. Yüksek çatlak büyüme hızlarında yorulma çizgilerinin kolayca tespit edilebildiğini belirlemiştir. Yorulma çatlak büyümesi başladığında her iki numunede de mikro boşlukların oluştuğunu, bu boşlukların çevrim sayısı ilerledikçe büyüdüğünü ve çatlak ile birleşmesi sonucu çatlak ilerlemesini kolaylaştırdığını vurgulamıştır (Q.Y. Wang ve ark. 2006).

Barrego ve ark., Al 6082-T6 ince levhaların periyodik yük etkisinde yorulma çatlak ilerleme davranışını incelemiştir. Bulunan yorulma çatlak büyüme davranışı sabit çevrimli yorulma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deneyler ASTM E647 standartlarına göre hazırlanmış merkez çatlaklı numuneler kullanılmıştır. Farklı yükleme koşulları Paris rejimi kullanılarak incelenmiştir. Çatlak ilerlemesinin gerilme oranının artması ile daha düşük çevrimlerde başladığı saptanmıştır. Ayrıca çatlak kapanma etkisinin plastik davranışta yük parametresini etkileyen önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur (L. P. Barrego ve ark. 2005).

Gasquares ve ark., doğal yaşlandırılmış Al alaşımında -50°C de yorulma çatlak ilerleme davranışını incelemiştir. Çatlak ilerleme hızının soğuk ortamda yavaşladığı saptanmıştır (C. Gasquares ve ark. 2005).

Homan, Al 2024-T3 ile yapılan çalışmalar sonucunda yorulma çatlak başlangıcının fiber takviyeli metal laminelerde metal tabakalardaki gerilme

çevrimleri ile belirlendiği ve eğer bu gerilmeler biliniyorsa yorulma başlangıç ömrünün S-N grafiğinden belirlenebileceği kabul edilmiştir. Alüminyum tabakalar arasındaki içi gerilmelerin lamineye uygulanan gerilmeden farklı olmasının sebebinin alüminyum ile fiber arasındaki rijitlik ve termal uzama katsayısı arasındaki farktan kaynaklandığını saptamıştır. Bu farklılıkların soğuma sırasında laminada artık gerilmelerinin oluşmasına neden olacağını bildirmiştir (J.J. Homan 2006).

Jeong, iki farklı kırılma kriterini Al 2024-T3 malzemede bileşik mod şartlarındayorulma çatlak büyümesinin karakterize edilmesi için kullanmıştır. Mühendislik yaklaşımı metodu ve sınır element metodu ile bulunan gerileme şiddet faktörü değerlerinin örtüştüğünü saptamıştır (D. Y. Jeong 2004).

Borrego ve ark., AlMgSi1-T6 ve alüminyum alaşımı malzemelere kompakt bileşik mod numunelerine çeşitli gerilme yoğunluk oranları kullanarak yorulma çatlak büyüme testleri uygulamıştır. Kompliyans tekniği kullanılarak çatlak kapanma kuvvetleri bulunmuştur. Çatlak kapanmasının mod I'e göre bileşik modun etkisi arttıkça çatlak yüzeylerindeki sürtünmeden dolayı arttığını kanıtlamıştır. Yani KI/KII oranı azaldıkça çatlak kapanma derecesi artmaktadır (L. P. Borrego ve ark. 2006).

Wu ve Bowen, 8% ve 35% oranında 1140/Ti-6-4 sürekli formda tek yönde fiber takviye edilmiş titanyum kompozitlerde enine yükleme koşullarında yorulma çatlak büyüme direncini incelemiştir. düşük hacimsel oranlı kompozit malzemede enine çatlak büyüme direnci monolitik malzemeye göre iyileşmiştir. Bunun nedeni olarak matris-fiber ayrılması sonucu oluşan boşlukların ilerleyen çatlak ile birleşerek çatlak ucu yarıçapını arttırmak süreti ile yorulma çatlak ilerleme hızını düşürmesi olduğunu belirtmiştir (X. Wu ve P. Bowen 2000).

Luyendijk ve Nieswaag, deney numunesi olarak sünek demir, 2% ile 3.7% silikon ve perlitik demir kullanarak, bu numunelerin yorulma dayanımları, çatlak açılma miktarları ve yorulma çatlak büyüme hızlarını ölçmüştür. Çatlak büyüme hızının malzemenin kompozisyonundan bağımsız olduğunu kanıtlamıştır (T. Luyendijk ve H. Nieswaag 1981).

Ding ve ark., hem takviyesiz hem de kısa fiber takviyeli alüminyum alaşımlı metal matrisli kompozitlerde sadece çatlak büyümesine dayanan düşük çevrimli yorulma modeli geliştirmiştir. Bu modelde çatlak malzemenin içinde ilk çevrimden itibaren başladığı ve ilerlediği kabul edilmiştir. Modelin kabul ettiği bir diğer kriter

çatlağın önünde bir yorulma hasar bölgesinin oluştuğu ve malzemede gerçek hasarın meydana geldiğidir (H. Z. Ding ve ark. 2002).

Guo ve Wu, “Moiré” tekniği kullanarak çatlak açılma miktarlarını ölçmüş, fiber köprülenmesinin çatlak açılma miktarı üzerine etkilerini ve geliştirdiği teorik model ile köprülenme gerilme dağılımını aramid ve cam takviyeli kompozitler için modellemiştir (Ya-Jun Guo, Xue-Ren Wu 1999).

Avcı ve ark., çelik fiber takviyeli betonarme kompozitlerde gerilme şiddet faktörleini başlangıç çatlak derinliği, kompliyans, J integral metodları kullanarak belirlemiştir (A. Avcı ve ark. 2004).

Andrianopoulos ve ark., tek kenar çatlaklı ve farklı eğimlerdeki çatlaklar içeren numuneler kullanarak, dış yükün etkisi ile birlikte çatlak açılma miktarlarını ölçmüştür. Kırılma kriteri ile çatlak açılma miktarları ilişkilendirmiştir. Haddelenmeden dolayı oluşan arafazın anizotropinin etkisini incelemiştir (N.P. Andrianopoulos 1997).

Poursartip ve ark., şekil değiştirme enerji boşalma hızı G 'nin çatlaklı test numunelerinde uygulanan yük ve deplasman gibi global parametreler kullanılarak hesaplandığını fakat global G değerlerinin fiber köprülenmesi ortaya çıktığında çatlak ucundaki koşulları tam olarak karşılayamadığını belirtmiştir. Bu nedenle yaptığı çalışmada mod I ve mod II durumlarında bölgesel şekil değiştirme hızının belirlenmesini sağlayan ve çatlak açılma miktarı ile çatlak kayma miktarına bağlı bir model geliştirmiştir (A. Poursartip ve ark.1998).

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1 Kompozit Malzemelere Giriş

Kompozit malzeme, terim olarak, iki veya daha fazla malzemenin makroskobik boyutta daha yararlı ve iyi özelliklere sahip üçüncü bir malzeme oluşturmak için bir araya getirilmesini belirtmektedir. Makroskobik boyutta bir araya getirmek bileşenlerin çıplak göz ile tanımlanabilmesidir. Farklı malzemeler makroskobik boyutta birleştirilebilir, metallerin alaşımlanması gibi, fakat sonuçta malzeme bütün pratik amaçlar için makroskobik olarak homojendir, bileşenler çıplak gözle ayırt edilemez.

Kompozit malzemelerin bilinen klasik metal malzemelere göre üstün yanları malzeme kombinasyonunun sonsuz sayıda olmasıdır. Kompozitlerin bu avantajları onlara malzeme özelliklerini istenildiği gibi değiştirme imkanı tanır. Dolayısı ile yapıda var olması istenen düşük ağırlık, yüksek mukavemet, yorulma ve aşınma dayanımı, estetik görünüm, elektriksel iletkenlik, rijitlik gibi özellikler kompozit malzemelerle daha iyi elde edilebilir. Rijitlik, mukavemet, yoğunluk, termal ve elektriksel özellikler için değişik değerler, uygun matris alaşımı, takviye elemanı, takviye şekli ve hacmi, takviyenin yönü ve bu kompozitlerin üretim metotları ile elde edilir Kompozit malzemelerin avantajları, tabii iyi bir şekilde dizayn edildiğinde, genellikle bileşenlerinin en iyi özelliklerini sergilerler ve sıkça da diğer bazı iyi fakat bileşenlerin sahip olmadığı özellikleri gösterirler. Aşağıda kompozit malzeme kullanarak geliştirilebilecek özellikler belirtilmiştir:

- Mukavemet
- Rijitlik
- Korozyon direnci
- Aşınma dayanımı
- Estetiklik
- Hafiflik
- Yorulma Ömrü
- Sıcaklığa bağlı davranış
- Termal izolasyon
- Termal kondüktivite
- Akustik izolasyon

Bu avantajların yanı sıra;

- Üretim güçlüğü
- İşlenmesinin güç olması yanında maliyetinin yüksek oluşu ve gerekli yüzey kalitesinin elde edilemeyişi
- Diğer malzemeler gibi geriye dönüşümünün olmayışı
- Kırılma uzamasının az oluşu gibi dezavantajları da mevcuttur.

Doğal olarak, bu özelliklerin hepsi aynı anda iyileştirilemez ve buna da gerek yoktur. Aslında, burada sayılan birçok özellik birbiri ile çatışmaktadır, örnek vermek gerekirse termal izolasyon ile termal iletkenliğe birbiri ile zıttır. Burada amaç sadece dizayn için gerekli hangi özellikler isteniyorsa, o özelliklerin iyileştirilmesi için kompozit malzeme üretmektir.

Kompozit malzemeler birden çok metalik, organik veya inorganik bileşenden oluşabilir. Bu bileşim neredeyse sınırsızdır. Yani elde etmek istediğimiz sonuç yapının özelliklerine göre aşağı yukarı istediğimiz her malzemeden bir kompozit elde edebiliriz. Ancak bu yapı içerisinde bulunacak olan destek malzemeler için bazı sınırlar vardır. Bir kompozit içerisinde bulunabilecek olan destekleyici yapılar fiber, partikül, pulcuk, lamine yada dolgu olarak bulunabilir. Bunların temel fonksiyonu gelen yükü taşımak ve matrisin rijitlik ve dayanımını arttırmaktır. Matrisin fonksiyonu ise fiberlara yük ve gerilim transferi sağlayabilmek için fiber-matrisi bir arada tutmak yanında, çoğu takviye elemanları gevrek ve kırılğan olduklarından onların yüzeylerini dış etkilere karşı korumaktır. Ayrıca plastiklik ve süneklik üstünlüğü ile fiberlarda kırılğan çatlakların yayılmasını önler. Plastik deformasyonlar ve çatlaklar varsa fiberlara paralel olarak yönlerini değiştirir.

3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler bileşenlerine göre kabul edilen dört gruba ayrılırlar. Bunlar;

1. Fiber takviyeli kompozitler
2. Parçacık takviyeli kompozitler
3. Tabakalı kompozitler
4. Bileşik kompozitler

3.2.1 Fiber Takviyeli Kompozitler

Kompozit malzemeyi meydana getiren biri, değişik malzemelerden meydana gelmiş olan fiberlerdir. Takviye malzemesi çeşitli formlardaki uzun fiberler, doğal olarak aynı malzemenin hacimsel hali için konuşulacak olunursa daha rijit ve güçlüdürler. Örneğin, sıradan cam plaka 20 MPa basınçta kırılırken, cam fiberlerin ticari olanlarının dayanımları 2800-4800 MPa arasında olup laboratuvar şartlarında hazırlanan cam fiberler ise 7000 MPa basınçlara dayanabilmektedir.

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirleyen önemli parametreler sırasıyla; fiberin uzunluğu, fiberin yönlenmesi, fiberin şekli ve kompozisyonudur. Bunlardan yönlenme en önemli faktördür. Fiberlerin yönelimi hangi yönde mukavemetin daha yüksek olacağını belirler. Üç tip fiber takviyesi vardır. Bunlar tek yönde, düzlemsel ve üç boyutlu takviyedir. Bunlardan tek yönde takviye yönlenme doğrultusunda en yüksek mukavemet ve elastisiteye sahiptir. Düzlemsel takviye her yönde farklı mukavemet gösterir. Bir yöndeki mukavemet o yöndeki fiber sayısı ile orantılıdır. Fiber yönlenmesi ne kadar rasgele olursa herhangi bir yönde mekanik özellikler zayıflar.

Uzun fiberler teorik olarak uygulanan gerilme yada kuvveti kesintisiz bir yolda iletirler. Ancak iki sebepten dolayı pratikte gerçekleşemez. İmalat faktörleri fiber boyunca optimum çekme gerilmesi elde edilmesini imkansız kılar. İdeal sürekli fiber yapısında fiberlerde hiç gerilme olmadığı yada eşit miktarda gerilme taşıdığı kabul edilir. Ancak gerçekte bu durum hiçbir zaman elde edilemez. İmalat neticesinde farklı iç gerilmelere sahip olan fiberlerden daha fazla ön gerilmeli fiberler uygulanan dış gerilmeleri destekler.

Kısa fiberlerden imal edilmiş kompozitlerde fiberler eğer yeterince düzgün yönlenmişse uzun fiberleri olan kompozitlerden daha büyük mukavemete sahiptir. Buna en iyi örnek viskerlerdir. Viskerler 10,3 GPa gibi yüksek çekme mukavemetine sahip olabilirler. Zira kısa fiberler daha az yüzey hatasına sahip bir biçimde imal edilebilirler. Kısa fiberlerden üretilmiş kompozitler düzlem yada düzensiz şekiller elde etmek için kullanılır.

Pratikte bütün fiberler dairesel kesitli olarak kullanılır. Dairesel kesitli fiberler daha kolay üretilirler. Cam, plastik ve metal fiberler farklı boyutlarda üretilirler. İnşaatlarda betonun takviye edilmesi için kullanılan çelik çubuklar kalın fiberlere örnek olabilir. Bazı fiberler 0,01mm 'ye kadar çapa sahip olabilirler. Genel olarak bir fiber ne kadar ince ise o kadar büyük mukavemete sahip olur. Bunun sebebi çap küçüldükçe muhtemel yüzey hatalarının elenmesidir. Karesel fiberler daha iyi bir paketleme faktörüne sahiptir. Hegzagonal yapılı tek kristal fiberler daha iyi mukavemet sağlamalarına rağmen üretilmeleri ve yapıya yerleştirilmeleri zordur.

Fiber takviyeli kompozitler için hem organik hem de inorganik fiberler mevcuttur. Organik fiberlerin genel karakteristikleri hafiflikleri, esneklikleri ve ısıya duyarlılıklarıdır. İnorganik fiberler ise çok yüksek mukavemet, ısı direnci, rijitlik ve düşük enerji absorpsiyonu ile tanınırlar.

Cam fiber, grafik fiber, bor fiber, kevlar fiber, organik fiberler, seramik fiberler gibi çeşitleri mevcuttur. Bunlardan en yaygını ve çok kullanılanı cam, grafit ve organik fiberlerdir.

3.2.2 Tabakalı Kompozit Malzemeler

En az iki değişik malzemenin tabakalar halinde dizilerek, teşkil etmiş olduğu kompozit malzemelere tabakalı kompozitler denir.

Tabakalama, tabakaları meydana getiren malzemelerin daha faydalı bir malzeme oluşturması için teşkil edilir. Tabakalama işlemiyle kompozit malzemenin mukavemeti, rijitliği, korozyon direnci, aşınma direnci, termal izolasyonu iyileştirilir. Bu tür iyileştirilmiş özellikler bimetallerden haddelenmiş metallere, tabakalanmış camlardan, plastik tabakalı laminelerde (tabakalanmış kompozitlerde) çok güzel şekilde görülebilir.

3.2.3 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Bu kompozitler tek veya iki boyutlu mikroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen mikroskobik partiküllerin matris ile oluşturdukları malzemeler olup ortalama gömülen parçacık boyutu 1µm'den büyük ve fiber hacim

oranı % 25’den fazla kullanılmamaktadır. En çok kullanılan parçacıklar ise Al_2O_3 ve SiC’den oluşan seramiklerdir. Burada yük, fiber ve matris tarafından birlikte taşınır ve özellikler yine izotropiktir. Bunlar büyük parçacık içerdiklerinden kaymayı etkili olarak yapamazlar. Bu kompozitler; metal, seramik ve polimerlerin birleşiminden oluşabilirler. Sert metal uçlar ve beton da örnek olarak verilebilir.

3.3 Metal Matrisli Kompozitler

3.3.1 Metal Matrisler ve Alaşımlar

Metal matris kompozitler (MMCs) uzay mekiklerinin prototiplerinde, büyük ticari yolcu uçaklarında elektronik altyapılarda, bisikletlerde, golf sopalarında ve çeşitli diğer uygulamalarda kullanılmaktadır. Metal matris kompozitlerin önemli çoğunluğunu alüminyum matris kompozitler oluştururken, yeni nesil metal matris kompozitler alaşımlar, titanyum, bakır, magnezyum ve demirin özelliklerine ihtiyaç duymaktadır.

Bütün kompozitler gibi, alüminyum matris kompozitlerde sadece alüminyum değil diğer malzemeler kullanılarak rijitliği, dayanımı, yoğunluğu, termal ve elektriksel özellikleri uygun hale getirilmiştir. Matris alaşımı, takviye malzemesi, takviyenin hacimsel oranı ve şekli, takviyenin konumu ve üretim yöntemi istenilen özellikleri elde etmek için çeşitlendirilebilir. Alüminyum kompozitler metal matris kompozitler içinde en düşük maliyete sahip olan kompozitlerdir. Ayrıca, mükemmel termal iletkenlik, yüksek kayma dayanımı, kusursuz aşınma direnci, yüksek sıcaklıkta işleyebilme, yakıtlar ve çözücüler tarafından en az hasar, geleneksel teçhizatlar kullanılarak şekillendirilebilme ve ısı işlem görebilme özelliklerine sahiptir.

Alüminyum matris kompozitler döküm, toz metalürjisi ve presleme yöntemleri ile üretilir. Sürekli olarak büyük miktarda yüksek kaliteye sahip ürünler elde etmek için büyük üretici firmalar yeni üretim yöntemleri geliştirmekte ve maliyeti düşürmektedirler. Alüminyum matris kompozitler fren rotorlarına,

pistonlara ve diğer otomobil bileşenlerine en başta bahsedilen uygulama alanlarında olduğu gibi mükemmel bir şekilde uygulanabilmektedir.

Metal matris kompozitler sıradan metaller ile karşılaştırıldığında:

- Yüksek dayanım/yoğunluk oranları
- Yüksek rijitlik/dayanım oranları
- Daha iyi yorulma dayanımı
- Daha iyi elektriksel özellikler
- Daha düşük termal genişleme katsayısı
- Daha iyi aşınma dayanımına sahiptir

Metal matris kompozitlerin polimer matris kompozitlere göre avantajları:

- Yüksek sıcaklık kapasitesi
- Ateş dayanımı
- Daha yüksek enine dayanım ve rijitlik
- Nem absorbe etmemesi
- Daha yüksek elektrik ve sıcaklık iletkenliği
- Daha iyi radyasyon dayanımı
- Gaz giderme işlemine gerek duymaması
- Geleneksel üretim yöntemleri kullanarak partikül takviyeli metal

matrisli kompozitlerin üretilmesi

Metal matrisli kompozitlerin metaller ve polimer matrisli kompozitlere göre bazı dezavantajları:

- Bazı malzemelere göre çok maliyetli olması
- Henüz tam olarak olgunlaşmamış bir teknoloji olması
- Fiber takviyeli sistemlerde kompleks üretim yöntemlerinin söz konusu

olması(döküm hariç)

- Bakım deneyimine sahip kişi sayısının az olması

1950'lerden bu yana metal matrisli kompozitlerde üzerinde yapılan çalışmalarda kullanılan matris ve takviyeler çeşitlilik göstermektedir. Yine de metal matrisli kompozitler gelişim sürecinin başında sayılabilir.

3.3.2 Metal Matrisli Kompozitlerde Takviye Elemanları

Metal matrisli kompozitlerde takviyeler beş esas kategoriye ayrılabilir, bunlar; sürekli fiberler, süreksiz fiberler, viskerler, partiküller ve teller. Tel dışındaki takviye elemanları, genellikle seramiktir.

Sürekli alümina fiberlerin birçok üreticisi bulunmaktadır. Fiberlerin kimyasal kompozisyonu ve mekanik özellikleri çeşitlilik göstermektedir. Grafit fiberlerin üretiminden önce poliakrilonitril (PAN) ve petrol sakızı elde edilir. Çok çeşitli dayanıma sahip grafit fiberlere rastlanmaktadır.

Alümina ve alümina-silica süreksiz fiber takviyelerinin en önde gelenleridir. Bu iki malzemede aslında yalıtım malzemesi olarak geliştirilmiştir. En önemli visker silikon karpittir.

3.3.3 Matris Malzemeleri ve Önemli Kompozitler

Çeşitli metaller matris malzemesi olarak kullanılabilir. Bunların en önemlisi alüminyum, titanyum, magnezyum ve bakır alaşımlarıdır.

En önemli metal matris sistemleri;

- Alüminyum matris

- Sürekli fiberler: bor, silikon karpit, alümina, grafit, çelik
- Süreksiz fiberler: alümina –silika
- Visker: silikon karpit
- Partikül: silikon karpit, bor karpit

- Titanyum matris

- Sürekli fiber: silikon karpit, kaplanmış bor
- Partikül: titanyum karpit

- Magnezyum matris

- Sürekli fiber: grafit, alümina
- Visker: silikon karpit
- Partikül: silikon karpit, bor karpit

- Bakır matris

- Sürekli fiber: grafit, silikon karpit

- Tel: niobyum-titanyum
- Partikül: silikon karpit, bor karpit, titanyum karpit

Metal matris kompozitlerde alüminyumun en fazla kullanılan matris malzemesi olmasının sebepleri şunlardır;

- Özgül ağırlığı küçük olduğu için hafif metal sınıfına girer.

Dayanım/ölgül ağırlık oranı yüksektir.

- Üstün mukavemet/yoğunluk ve tokluk/yoğunluk oranlarına sahip kompozit malzemelerin üretimi amacıyla alüminyum, en çok kullanılan metalik matris malzemelerinden biridir.

- Kolay oluşan koruyucu oksit tabakadan dolayı havanın ve çeşitli kimyasal maddelerin etkilerine dayanıklıdır. Korozyon direnci yüksektir. Kaynak ve lehimlemede alüminyum oksit giderici maddeler kullanılması gerekir veya koruyucu gaz altında yapılır. Ayrıca oksijene karşı olan yüksek reaksiyona girme isteğinden dolayı döküm kabiliyeti kötü, daha düşük mekanik özellikler gösterir ve talaşlı imalatla işlenebilirliği kötüdür .

- Düşük ergime noktası dolayısıyla yüksek sıcaklıklarda özellikleri iyi değildir. Düşük ergime sıcaklığında kendini çekmesi yüksek olduğu için döküm işleminde saf Al yerine genelde alaşımları kullanılır.

- Elektriğı ve ısıyı iyi iletir.

- Sünek olduğu için soğuk şekil verilmesi kolay, talaş kaldırılarak işlenmesi güçtür.

3.3.4 Metal Matrisli Kompozitlerin Karakteristiğı ve Dizayn Parametreleri

Metal matrisli kompozitlerin kullanım alanlarına bağı olarak özellikleri ve avantajları değişmektedir. Metal matrislerin en önemli karakteristiğı , özel bir dizayn için gerekli özellikleri sağlayabilmek için matris elemanını, takviye elemanını veya tabaka konfigürasyonlarını değıştirerek sağlanabilmesidir.

Örneğın, geniş limitlerde, özellikle bir yönde dayanımı ve rijitliğı arttırmak, diğır yönde ise genişleme katsayısını azaltmak mümkündür. Bu klasik malzemelerde çok nadir rastlanan bir durumdur.

Sıradan metaller izotropik olma eğilimindedirler, bu nedenle her yönlerindeki özellikler aynıdır. Ancak haddeleme gibi bazı işlemler anizotropiye sebep olabilir ve özelliklerin yön ile değişmesine neden olabilir. Monolitik metallerin gerilme-şekil değiştirme diyagramları tipik olarak elastik-plastiktir. Yapısal metallerin birçoğu önemli sünekliliğe ve kırılma tokluğuna sahiptir.

Metal matrisli kompozitlerin çok çeşitliliği çok farklı özelliklere sahip olmasından gelir. Metal matrisli kompozitlerin karakteristiğini etkileyen önemli faktörler:

- Takviye elemanının özellikleri, şekli
- Takviye elemanının hacimsel oranı
- Matrisin özellikleri, gözenekliliği kapsayan etkiler
- Kompozitin mekanik ve termal geçmişine bağlı olarak ortaya çıkan artık gerilmeler
- Yüksek sıcaklıklardaki kimyasal reaksiyonlardan dolayı takviye malzemesinde meydana gelen yıkılma, bozulma, çeşitli üretim işlemleri sırasında oluşan mekaniksel hasarlar, darbe vb.

Sıralanmış fiberler ile takviye edilmiş metal matris kompozitler anizotropik davranış sergilerler. Fiber yönünde bu malzemeler daha dayanıklı ve rijitliği daha fazladır. Tek yönde fiberler ile takviye edilmiş metal matrisli kompozitlerde enine dayanım ve rijitlik kullanıldığı yere bağlı olarak yeterli olabilir. Bu özellik metal ve plastik matrisli kompozitlerin enine takviye edilmeden de nadiren kullanılmasını sağlar.

Metal matrisli kompozitlerde matrisin ve takviyelerin elastisite modüllerinin ve dayanımlarının kompozit malzemenin davranışına olan katkısı önemlidir. Metal matrisli kompozitlerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri genellikle malzeme akma dayanımına ulaşana kadar nonlineer davranış sergiler.

Fiber takviyeli kompozitlerde, kompozitin davranışına önemli derecede etki eden diğer bir etkende matris ve fiberlerin termal genleşme katsayılarını farklı olmasıdır. Bu farklılık malzeme yüksek sıcaklık farklarına maruz kaldığında artık gerilmelerin oluşmasına neden olacaktır. Aslında bu malzemelerde soğuma periyoduna girildiğinde matristeki termal gerilmeler malzemenin akmasına neden

olacak büyüklüğe erişecektir. Ayrıca büyük miktardaki artık gerilmeler mekanik yüklemeye bağlı olarak ta oluşabilir.

Her ne kadar fiber takviyeli metal matrisli kompozitlerin gerilme-şekil değiştirme eğrisi nonlineer davranış sergilese de aslında bu malzemeler gevrek malzemelerdir. Sünekliğin yokluğunda gerilme konsantrasyonlarını azaltmak için birleştirme dizaynı önemli bir kriter haline gelir. Bu nedenle metal matrisli kompozitleri bir araya getirmek için bir çok yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerde metalürjik ve polimerik bağlantılar ile mekanik bağlayıcılar kullanılmaktadır.

3.3.5 Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Üretim yöntemi bütün malzemelerde olduğu gibi metal matrisli kompozitler içinde çok önemli bir dizayn parametresidir. Bu alanda halen devam eden çalışmalar sayesinde üretim proseslerinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir.

Şu anda metal matris kompozit malzemelerin üretimde kullanılan yöntemler biricil ve ikincil olmak üzere ikiye ayrılabilir. Birincil işlemler bileşenleri kullanarak metal matrisli kompozit üretme yöntemleridir. Bu işlem sonucunda üretilen metal matrisli kompozit malzeme istenilen özelliklere sahip olabilir veya istenilen özellikleri elde etmek için birincil işlemlere ilave işlemler yapılması gerekebilir. Bu işlemler ikincil işlemler olarak tanımlanır ve şekil verme, haddeleme olabilir. İkincil işlemler, metal matrisli kompoziti meydana matrisin ve takviye elemanının özelliklerine bağlıdır.

Birincil ve ikincil işlemler sırasında yüksek sıcaklıklarda ortaya çıkabilecek kritik bir hususta matris ve takviye elemanı arasında reaksiyon sonucu oluşan ve eritilmesi gereken ara fazdır. Bazen takviye elemanlarına uygulanan kaplamalar bu ara fazın oluşmasını engellemiştir. Örneğin, bor fiberlerin bor karpit ile kaplanması sayesinde titanyumun bu fiberlar ile takviye edilebilmesi sağlanmıştır. Matris ile takviye elemanı arasında gerçekleşebilecek reaksiyonlar metal matrisli kompozitlerin ortam sıcaklığına bağlı olarak servis ömrünü de belirler.

Göreceli olarak büyük çapa sahip olan fiberler, bor ve silikon karpit gibi, metal matrislere sıcak presleme yöntemiyle ve folyolarla sarılarak yerleştirilir. Bu

işlem sırasında matris elemanı fiberler arasına akar ve difüzyon yoluyla bağlanma gerçekleştirilir. Aynı yöntem kullanılarak fiberler ile takviye edilmiş lamine kompozitler farklı yönlerde dayanımı ve rijitliği sağlamak amacıyla bir araya getirilebilir. Bazı örneklerde, tek tabakalı lamine kompozitlerde ikincil işlemler dikkate alınarak sıcak presleme yöntemiyle üretilebilir.

Tek tabakalı kompozitler ayrıca metal plazma püskürtme yönteminin devamında uygulanan sıcak presleme yöntemiyle üretilebilir. Laminelerin son şekli kalıplarda sürünme veya plastik şekil verme sonucu gerçekleştirilebilir. Bir diğer alternatif üretim şeklide fiberlerin kalıp içine yerleştirilmesi sıcak presleme ile birleştirilmesinin gerçekleştirilmesidir.

Kompozitler kumaş içine veya önceden hazırlanmış preform adı verilen fiber konfigürasyonunun içine sıvı metal infiltrasyonu ile de yapılabilir. Fiber takviyeli kompozitlerde çok sık rastlanan bir diğer durum da seramik veya organik bağlayıcıların fiberlerin bir arada tutulması için kullanılmasıdır. İnfiltrasyon işlemi vakum, basınç veya her ikisinin aynı anda olduğu ortamlarda gerçekleştirilir. Basınçlı infiltrasyon sıkıştırılmalı döküm olarak adlandırılır.

Şu anda grafit/alüminyum ve grafit/magnezyum kompozitlerin üretiminde kullanılan en yaygın metot infiltrasyondur. Grafit iplikçikleri ilk olarak bir fırında yakılır. Daha sonra kimyasal buharlaşma yöntemi ile yüzeyine titanyum veya bor kaplanır. Bu işlem grafit iplikçiklerinin matris tarafından daha çok ıslanabilmesini sağlar. Ardından hızlı bir şekilde matris banyosuna sokulur.

4.YORULMA

Yapı elemanlarında hareketli yüklerin toplamı, yükün önemli bir oranını teşkil etmesi durumunda, yapılara değişken kuvvetler etki etmekte ve bunun sonucunda yapı elemanlarında değişken gerilmeler oluşmaktadır. Bu durumda yapı elemanının herhangi bir kesitine ait bir noktasının Q_{min} ile Q_{max} arasında devamlı olarak değişken bir gerilme etkisi altında kalmasına yorulma olayı denir. Mühendislik işlerinde yorulma olayı ile sık sık karşıımıza çıkan köprüler özellikle çelik köprü elemanları bu çeşit zorlamaların etkisi altındadır. Raylar, her türlü nakil vasıta dingilleri, uçak kanatları, uçak gövdesi ve diğer elemanları yorulmaya maruz kalmaktadır.

Yorulma ASTM E 206-72’ de aşağıdaki gibi tariflenmektedir; “Bazı nokta veya noktalardaki tekrarlı gerilme veya uzama şartlarına maruz malzemelerde görülen, yeterli bir tekrar sayısından sonra çatlakların büyümesine veya tamamen kırılmaya sebep olan, lokalize sürekli gelişen, kalıcı yapı değişikliği olayıdır. İkinci tanımlamada üzerinde durulan dört önemli özellik; olayın sürekli gelişmesi, lokalize olması, çatlakların büyümesi ve sonuçta kırığın ortaya çıkmasıdır. Uygulamada makinalara ve dolayısıyla makina parçalarına genellikle büyüklüğü ve yönü düzenli veya düzensiz olarak zamanla değişen kuvvetler, gerilmeler, eğilme ve burulma momentleri etki ederler. Bu tür zorlanma etkisi altındaki bir makine elemanı, akma sınırı altındaki bir gerilmede beklenmedik bir tarzda kırılabilir. Bu tür kırılmalara yorulma kırılması adı verilir (Samancı,2004).

Yorulma hasarı, yüzeyden başlayan mikro çatlaklar şeklinde oluşmaktadır. Yüzey düzgünlüğü ve direnci yorulma ömrünü etkileyen önemli faktörlerdir. Yorulma hasarı belirli bir süre dinamik yüklemeye maruz kalmanın sonucunda oluşmaktadır. Bu süre malzemenin türüne yüzeyin kalitesine ve dinamik yükün büyüklüğüne, frekansına bağlı olarak değişmektedir. Kullanım sürecinde yorulma çatlaklarının oluşması kaçınılmaz olmaktadır. Yüzeyinde çatlakları ve oyukları

içeren bir yapı, ideal bakım periyotların da, yorulma hasarının mikro boyutta iken tespiti, yapının emniyeti açısından büyük önem taşımaktadır. Korozyon yüzey kalitesini bozan bir etken olması nedeniyle, yorulma riskini arttırmaktadır. Ayrıca yorulma gerilmeleri gerilme korozyonuna neden olmaktadır

Yorulma tekrarlanan yüklerin sebep olduğundan dolayı metal malzemelerde kompozitlere göre beklenmedik sonuçlar verir. Ve daha tehlikelidir. Kompozit malzemelerdeki fiber kırılması, delaminasyon, matris çatlaması, boşluklar gibi hatalar alışlagelmiş metallerdeki çatlak gibi hatalardan daha fazla olabilir. Ancak, bir metaldeki hasar gelişimi daha beklenmediktir. Bu yüzden alışlagelmiş metaller potansiyel olarak kompozit malzemelerden daha tehlikelidir. Elastik bölgede ki gerilmelerde oluşur ve bölgesel plastik deformasyonlar oluşturur. Yorulma olayı çatlak oluşması, çatlak ilerlemesi ve kırılma olmak üzere üç aşamada gerçekleşir.

4.1 Yorulma Deneyleri

Bir numuneyi değişken gerilmelerin etkisine bırakabilmek için, elektro-mekanik, mekanik, elektro-hidrolik, hidrolik v.b. gibi tertibatları bulunan özel yorulma test cihazları kullanılır. Deneyler sırasında malzemeye zamana bağlı olarak değişen, maksimum ve minimum sinüs eğrili periyodik gerilmeler uygulanarak yükleme yapılır. Bu yükler malzemenin içyapısında yıpranmalara ve ayrılmalara neden olur. Bu durum elastik bölge sınırları içerisinde olur. Bu periyodik olarak değişen gerilmelerin malzeme üzerinde oluşturduğu olaya yorulma, hasar ve kırılma meydana gelinceye kadar geçen süreye de yorulma ömrü denir.

Yorulma deneyi sırasında uygulanan yükler üç ana grupta incelenebilir ve aynı zamanda deneyde kullanılan gerilme türü de deneye adını vermektedir.

Bunlar

- Sabit büyüklükte gerilme,
- Sabit büyüklükte şekil değişikliği,
- Rasgele veya sabit büyüklükte yükleme

Yorulma deneyleri uygulanan yorulma hızlarına göre de üç grupta incelenir;

- Yüksek çevrim sayılı

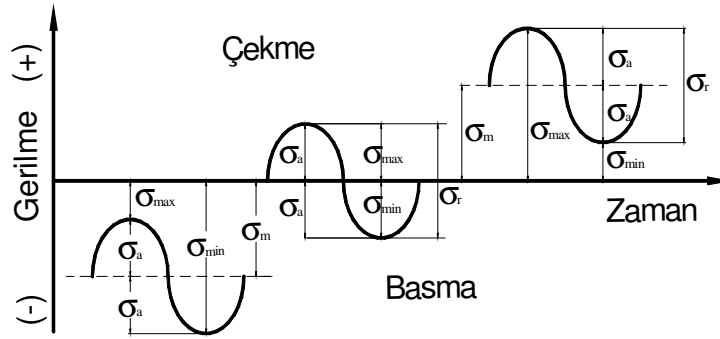
- Düşük çevrim sayılı
- Çok yüksek hızlı yorulma deneyleri.

Genel olarak uygulanan en büyük gerilme değeri malzemenin elastik sınırı altında ve yorulma ömrü yaklaşık 1.000 çevrim sayısından daha büyük ise bu tür yorulmaya yüksek çevrim sayılı yorulma denir. Uygulanan gerilme malzemenin elastik sınırının üzerinde ve 1.000 den daha küçük çevrim sayılarında hasar ortaya çıkıyorsa bu tür yorulmaya düşük çevrim sayılı yorulma denir. Çok yüksek hızlı yorulma deneyleri, deney süresini en aza indirmek, kompresör ve türbin kanatları gibi çok yüksek devirlerde çalışan elemanların denenmesini sağlamak amacıyla ve değişik çalışma hızlarının malzemenin yorulma dayanımları üzerindeki etkisini ortaya çıkarabilmek için uygulanmaktadır. Bir deneyin yüksek hızlı olabilmesi için çevrim sayısının dakikada 10.000 den daha fazla olması gerekir. Dakikada uygulanan çevrim sayısının değeri arttıkça yorulma ömründe % 3-13 arasında artışlar olduğu tespit edilmiştir (Kayalı, 1983).

4.2 Tekrarlı Yüklemeler Ve Gerilme Tipleri

Mühendislik yapı elemanları üzerinde ki yükler belirli zaman aralıklarında ve belirli sürelerde uygulanıyorsa bunlara tekrarlı yükler, oluşan gerilmelere de tekrarlı gerilmeler denir. Örneğin motor şaftları, tren rayları, araba aksları, yaylar, dişliler v.b. gibi makine elemanları üzerine gelen yükler tekrarlı yükler ve gerilmelerdir. Dolayısıyla tekrarlı yükleme ve gerilmenin olduğu yerde de yorulma olayı ortaya çıkar.

Tekrarlı tesir altında gerilmenin en büyük ve en küçük değerinin basınç veya çekme olmasına göre Şekil 4. 1' de görüldüğü gibi karakter bakımından farklı üç tip çevrim bölgesi düşünülebilir. Bunlardan ilki, kuvvetin negatif değerden başka bir negatif değere değiştiği bölgedir, ki buna negatif tekrar bölgesi veya basma tekrar bölgesi denir (Dieter,1988).



Şekil 4.1 Tekrarlı gerilme-zaman eğrileri

İkinci bölgede gerilme, çekme ile basma değeri arasında değişir ki buna da alternatif bölge denir. Üçüncü tekrar bölgesinde ise gerilme, pozitif bir değerden yine başka bir pozitif değere değişir ki buna pozitif tekrar bölgesi veya çekme tekrar bölgesi denir. Değişken gerilmelerin etkisiyle malzemenin iç bünyesindeki değişikliklere yorulma, elemanın kopuncaya kadar dayandığı süreye ise yorulma ömrü denir.

Şekil 4.1' de gösterilen parametreler, maksimum ve minimum gerilme kullanılarak, gerilme aralığı σ_r , gerilme genliği σ_a , ortalama gerilme σ_m ve yorulma gerilme oranı R gibi parametreler aşağıda tanımlanmıştır:

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (4.1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (4.3)$$

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4.4)$$

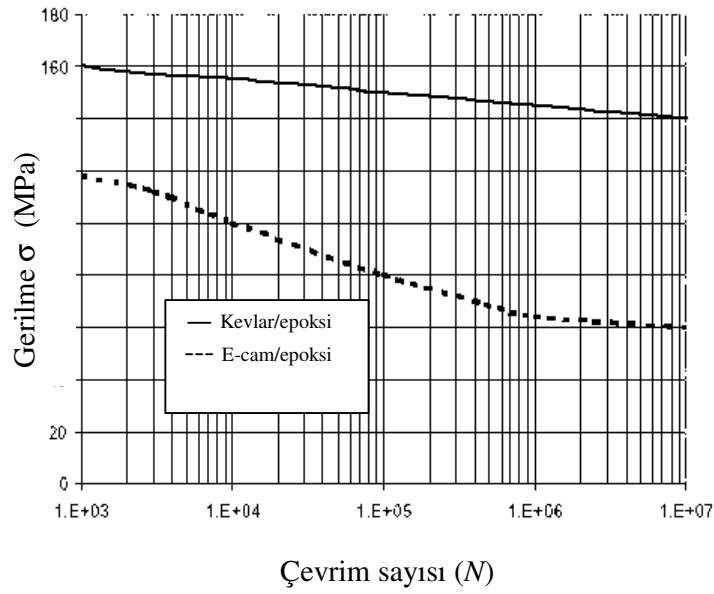
Burada R değeri, yorulma yükleme biçiminin bir göstergesi olup, önemli yükleme biçimleri Tablo 4.1' de özetlenmiştir.

Tablo 4.1 Yorulma yük biçimleri için R değerleri

Yorulma Yük Biçimi	Yorulma Yük Oranı
Statik Yük	$R=1$
Çekme-Yükünü boşaltma	$R=0$
Çekme-Çekme	$0 < R < 1$
Çekme-Basma	$R=-1$
Çekme-Basma	$-1 < R < 0$

4.3 Yorulma (S/N) Grafiği

Yorulma performansı, verilen maksimum gerilme miktarı (S) ve malzemenin bu yüke karşı gösterdiği çevrim sayısı (N) ile ifade edilir. Bunun yanı sıra yorulma performansının tam anlaşılabilmesi için, yorulma gerilme oranı R değerinin de bilinmesi gerekir. Yorulma test sonuçları maksimum gerilme miktarı ile çevrim sayısının 10 tabanına göre logaritmik ölçekli olarak çizilmesi ile grafiksel olarak elde edilir. Bu grafiğe (S/N) veya gerilme-çevrim sayısı grafiği denir.



Şekil 4.2 Farklı iki kompozit malzeme için $S-N$ diyagramı

$S-N$ grafiğinin eğimi ya da matematiksel fonksiyonu, malzemenin yorulma direncinin bir ölçüsüdür ve her malzeme türü için farklı bir durum gösterir. Bunun yanı sıra yorulma ömrü gerilmenin büyüklüğüne, gerilme oranı R' ye, yüklemenin durumuna, yükleme geçmişine ve çevre şartlarına bağlıdır. Şekil 4.2. de tek yönlü E cam/epoksi ve kevlar/epoksi kompozit malzemeler için örnek S/N grafiği görülmektedir. Buradaki E cam/epoksi S/N grafiği birçok metal malzemelerle benzerlik göstermektedir ve düşük gerilme değerlerinde çok yüksek çevrim sayılarına çıkılabilir. (Şahin, 2000)

4.4. Kompozit Malzemelerde Yorulma

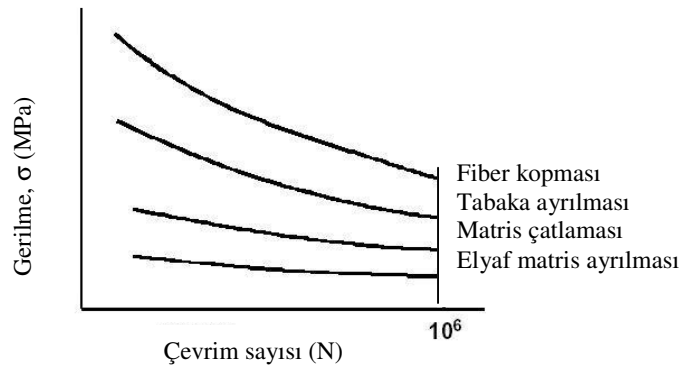
Tek yönlü ve tek tabakalı bir kompozit malzemedeki yorulma hasarı fiber kopması, matris çatlaması ve matris-fiber ayrılması olarak üç şekilde görülür. Fiber kopması veya kırılması fiberin dayanımına bağlıdır. Matris çatlaması, eğer fiberler matrise aktarılan şekil değişim miktarını veya şekil değiştirme miktarını sınırlayan yüksek katılığa sahipse önlenir. Fiber-matris ara yüzeyindeki birbirine bağlılık

ise, fiber-matris bağlanma dayanımının zayıflaması ile büyür ve ayrılma olayı meydana gelir.

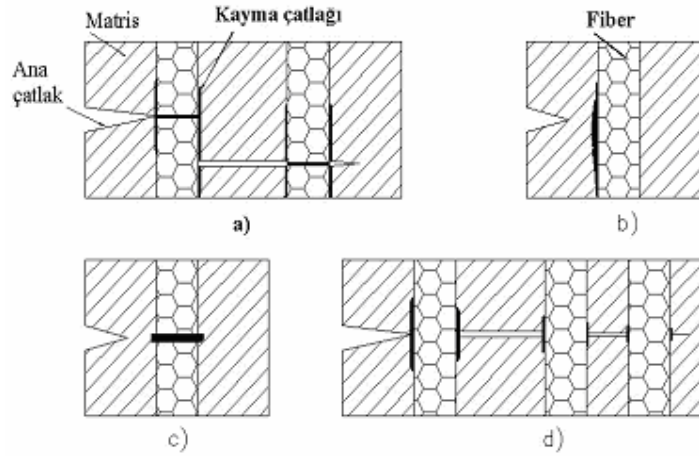
Çok tabakalı kompozitlerde ise yukarıdaki hasar şekillerine ilaveten yorulma etkisi altında dördüncü bir şekil daha ortaya çıkar. Buna tabaka ayrılması denir. Şekil 4.3.' de kompozit malzemelerde yorulma hasar şekilleri S/N grafiği üzerinde görülebilir.

Kompozitlerde yorulma hasarının iki aşamada gerçekleştiği düşünülebilir. Bunlar, çatlak başlaması ve çatlak ilerlemesidir. Genellikle düşük çevrimli yorulmalarda olduğu gibi, yüksek yorulma gerilme seviyelerinde, başlangıç aşaması, çok erken çevrim yüklerinde meydana gelir. Ve yorulma ömrünün büyük bir kısmını çatlak ilerlemesi teşkil eder (Günaydın,2003).

Yüksek çevrimli yorulma şekillerinde ise yorulma ömrünün büyük kısmını, çatlağın meydana gelmesi oluşturur. Metal malzemelerde yorulma çatlağı yüzeyde büyük gerilme yığılmalarından dolayı meydana gelir. Kompozit malzemelerde ise matriste olabilecek fiber-matris arasındaki boşluklar veya süreksizlikler birer çatlak başlangıcı olabilirler.



Şekil 4.3 Kompozit malzemelerde yorulma hasar biçimleri S-N grafiği



Şekil 4.4 Kompozit malzemelerde yorulma sırasında olabilecek hasar çeşitleri

- a) Kayma çatlakları ile meydana gelen fiber kırılması ve matris çatlaması,
- b) Çekme ile oluşturulan kayma çatlakları,
- c) Çatlak önü fiber kırılması,
- d) Fiber kırılması olmaksızın matris çatlaması

Kayma etkisiyle oluşan çatlakların ilerlemesiyle beraber, fiber ve matris çatlaması oluşan bir kompozitte yorulma çatlaklarının ilerlemesi süresince mümkün olabilecek sayıda olay meydana gelebilir. Örneğin kayma çatlakları, tek başlarına çekme yükü ile beraber yırtılmaya, matris çatlaması olmadan çatlak önü fiber kırılmasına veya fiber kırılması olmadan matris çatlamasına sebep olurlar.

Şekil 4.4' de görüleceği üzere kompozit malzemelerde yorulma sırasında olabilecek hasar çeşitleri, tek yönlü ve tek tabakalı veya çok tabakalı kompozitlerin her ikisinde de görülebilir. Ancak, çok tabakalı kompozitlerde fiber açısı ve tabaka sınırları, yorulma çatlak ilerlemesinde rol oynayan önemli faktörlerdendir.

4.4.1. Kompozit Malzemelerde Yorulmayı Etkileyen Faktörler

Kompozit malzemelerde yorulmayı etkileyen birçok faktör vardır. Bunlar fiber özellikleri, matris özellikleri, katların veya tabakaların yönü ve fiber hacmi gibi özelliklerdir.

Tek tabakalı ve tek yönlü fiber kompozitler yüksek dayanım ve yüksek katılığa sahip oldukları için, yorulma dayanımının da artmasına sebep olurlar. Ayrıca yüksek katılığa sahip fiberler, matris içerisinde oluşabilecek şekil değişimini sınırlayarak, matristeki çatlakların oluşumunu geciktirirler ve en az miktarda oluşmasına katkıda bulunurlar. Bilindiği üzere yüksek statik dayanıma sahip malzemelerin yorulma dayanımı da yüksektir. Dolayısıyla yüksek katılık ve dayanıma sahip fiberler, kompozit malzemenin yorulma ömrünün artmasına da yardımcı olurlar.

Kompozitler deki yorulma direnci, mukavemetli ve yüksek kırılma şekil değiştirme miktarına sahip matrislerle artırılabilir. Termal direnç yine kompozitler için önemli bir faktördür.. Özellikle cam fiberlerde dayanımın azalmasına sebep olduklarından matris seçiminde ısı yalıtkanlığın yüksek olmasına dikkat edilir. Yine düşük dayanıma sahip silikon matrisler, kompozit malzemenin yorulma dayanımının da az olmasına sebep olur. Polyester matrisler orta dayanıma sahip polimerler olduklarından yorulma ömrüne olumlu katkı yaparlar. Yüksek dayanıma sahip epoksi matrislerde yorulma direncinin artmasında önemli rol oynar.

Kayma gerilmesi sonucu oluşan çatlaklar, kırılma yüzeyini ve çekilen enerjiyi arttırdıklarından dolayı yorulma ömrü üzerine pozitif bir etkiye sahiptirler. Ayrıca bu çatlaklar çatlağın körleşmesine de sebep olurlar. Kayma çatlakları matris ve fiber arasındaki farklı "Poisson oranı" sebebiyle yorulma çatlağı boyunca oluşabilir. Eğer fiberlerin hasar şekil değiştirmesi matrisinkinden az ise, fiberler çatlak doğrultusunda hasara uğrayabilir. Sünek fiberler ile gevrek matristen oluşan kompozit malzemelerde ise matris daha önce hasara uğrayabilir.

Fiber açısının çatlak ilerlemesi üzerine etkisi büyüktür. Çatlak ilerlerken fibere paralel doğrultuda çok az bir engelle karşılaşır. Bu durumda şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı az olacağından dolayı çatlak, fibere paralel ilerler. Sonuçta çapraz katlı tabakalı kompozitlerde 0° ve 90° 'lik tabakalar hem statik hem de

değişken yüklemelerde ilk hasara uğrayan bölgelerdir. Enine tabakalardaki çatlaklar, tabakalar arası bölgedeki kayma çatlakları ile veya çatlak körleştirmesi sonucu durdurulabilir.

4.4.2 Kompozit Malzemelerde Yorulma Olayının ve Çatlağın Gelişimi

Yorulma olayının gerçekleşmesi için malzeme ya da makine parçasına çekme gerilmesinin uygulanması, bu gerilmeye değişimlerin ya da dalgalanmaların olması ve bu esnada plastik şekil değişiminin gözlenmesi gerekir. Bu üç faktörden herhangi biri olmazsa yorulma çatlağı başlamaz ve ilerleyemez.

Çekme gerilmesinde meydana gelen değişimler ve dalgalanmalar çatlağı başlatır. Çatlağın ilerlemesi ise çekme gerilmesinin etkisiyle olur. Yorulma üzerine yapılan çalışmaların başlangıç dönemlerinde çevrim sayısını belirlemek üzere sabit büyüklükte değişken gerilmelerle malzemeler yüklenmekteydi. Daha sonraları ise yorulma hasarlarının metalurjik hatalardan ve tasarımlardan kaynaklandığı ve çatlakların süreksizliklerden başlayıp ilerlediğinin tespit edilmesi üzerine yorulmanın bazı kademelerden geçerek meydana geldiği ve ilerlediği fikrine varıldı.

Kırılma mekaniği açısından bir yapı veya makine elemanının ömrü üç adımda incelenir. İmalattan kaynaklanan bir kusurun ya da sürünme, yorulma etkisiyle bir mikro çatlağın oluşumu olan çatlak başlangıcı safhası, kırılma tokluğu ve gerilme şiddet faktörü ile kontrol edilen kararlı çatlak ilerleme safhası ve hızlı çatlak ilerlemesi ile ani kopmanın meydana geldiği kırılma safhasıdır. (Güldü 1995)

Yorulma üç kademedeyi meydana gelir.

- i) Çatlak başlaması**
- ii) Çatlak ilerlemesi**
- iii) Kırılma**

Bunun yanı sıra malzemeler üzerine çatlaklar açılarak da yorulma deneyleri yapılabilir. Nitekim bu çalışmada deney malzemesinin ortasına farklı açılarda

çatlaklar açılmıştır. Bu durumda yorulma mevcut çatlaktan dolayı çatlak başlamasından değil de, çatlak ilerlemesi kademesinden başlar. Ve kırılma ile son bulur.

4.5.3 Yorulma Çatlak Başlaması

Malzemelerde talaşlı işleme sonucu oluşan izler, malzeme yüzeyindeki çizgiler, malzeme içindeki sert yabancı maddeler, çökelmiş sert tanecikler, ikiz sınırları ve tane sınırları gibi kristal süreksizlikler çatlak başlamasını etkileyen unsurlardır.

Mühendislik malzemelerindeki sert metalik olmayan karbürler, borürler, nitrürler ve sülfürler gibi inklüzyonlar ile döküm boşlukları, çatlaklar, dekarbürizasyon tabakaları ve kalıntı östenit gibi hatalar çatlağın başlamasına sebep olabilir. Bunların büyüklüğü ve yerleştiği alanlar (tane içi ve tane sınırı) çatlağın oluşum ve ilerleme başlangıç hızını dolayısıyla da yorulma ömrünü etkiler (Çep ve ark. 2002).

Zorlamalar sonucu makine ve yapı elemanlarında oluşan gerilmeler her zaman ideal olmaz. Çekme ve basma gerilmeleri parça kesitinde eşit olarak dağılmayabilir, eğilme ve burulma gerilmeleri yüzeyden ortaya doğru bir azalma göstermeyebilir. Uygulamada bu gerilme dağılımlarında az veya çok sapmalar görülebilir. Parçanın şekli, yüzey kalitesi, ortamın korozyon etkisi, kuvvet iletiminin türü, ön gerilme, malzeme hatası, mikro yapının büyük ölçüde heterojen olması gibi nedenlerle yerel gerilme yığınları oluşur. Bu gerilme yığılmalarının bulunduğu bölgelerde yorulma çatlağı başlar. Aşırı zorlanan bir bölgede çatlağın başlaması durumunda ise yorulma kırılmasının önlenmesine genellikle imkan yoktur.

Kırılmanın oluşması ise belirli bir çevrim sayısında çatlağın ilerlemesiyle olur. Yorulma sonucu oluşan keskin çatlak ek bir çentik etkisi ortaya çıkararak meydana gelen yüksek gerilme yığınları, çatlağın hızla ilerlemesine ve büyümesine neden olur.

4.5.4 Yorulma Çatlak İlerlemesi

Yorulma çatlak ilerlemesi üç safhada gerçekleşir. 1.safha, çatlağın oluşum safhası olup bu bölge, gerilme şiddet faktörü kritik değere ulaşınca kadar devam eder. 2.safha çatlağın ilerleme safhasıdır. 3.safha ise kırılmanın meydana geldiği bölgedir.

Kompozit malzemelerde çatlaklar genellikle, fiber-matris, ara yüzey ve reçine dayanımlarının, düşük olması nedeniyle fiber boyunca oluşmakta ve ilerlemektedir. Bu ilerlemeyi takiben ara yüzey ayrılması, enine çatlama, delaminasyon ve fiber kopması takip eder.

Yorulma kırılmalarının büyük çoğunluğu (%85-90) malzeme hatalarından dolayı değil, çentik etkisi yapan şekil ve yüzey etkilerinden, aşırı yüklemekten, montaj hatalarından, yetersiz bakım ve benzeri nedenlerden ortaya çıkmaktadır (Günaydın,2003).

Çatlak ilerlemesi, çatlak uzunluğuna karşı çatlak büyüme hızı (da/dN) olarak veya gerilme şiddetine karşı çatlak büyüme hızı olarak tanımlanır. Çatlak ilerleme hızının hesaplanabilmesi için Lineer Elastik Kırılma Mekaniği (LEKM) yardımıyla hazırlanan çeşitli denklemler mevcuttur. Paris-Erdoğan denklemi de bu denklemlerden biridir (Ewalds, H.L. ve ark., 1985). Bu denklem

$$da/dN=A(\Delta K)^n \quad (4.5)$$

şeklindedir. Bu denklemde da/dN çatlak ilerleme hızı, ΔK gerilme şiddet faktörü ($G\sqrt{F}$) değişimi, n ve A ise malzeme sabitleridir. Aynı şekilde enerji boşalma miktarı içinde aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$da/dN=B(\Delta G)^m \quad (4.6)$$

Bu denklemde de da/dN çatlak ilerleme hızı, ΔG enerji boşalma miktarı değişimi (çatlağın ilerlemesi için gerekli olan enerji), m ve B ise malzeme sabitleridir.

ΔK gerilme şiddet faktörü değişimi ve ΔG enerji boşalma miktarı değişimi kırılma mekaniği bölümünde (5. bölüm) detaylı olarak anlatılmıştır.

5. KIRILMA MEKANİĞİ

Kırılma, gerilme altında bir maddenin iki veya daha fazla parçaya ayrılması veya parçalanmasıdır. Kırılma olayı, bir çatlağın başlaması ve ilerlemesi olarak iki kısımda incelenir.

Yük taşıyan yapılarda hasar, en genel anlamda akma veya kırılmayla olur. Bir malzemenin yapısındaki hatalar iki tip hasar için de çok önemlidir fakat aralarında önemli farklar vardır.

Akmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar, kristal kafesi düzlemlerinin sürekliliğini bozan ve dislokasyon hareketini engelleyen hatalardır. Bu da metallerdeki mukavemet artışı için gerekli bir olaydır.

Kırılmayla oluşan hasarda önemli olan hatalar ise makroskobik boyuttadır, çünkü genel bir plastik deformasyon değil, hatalarla bağıntılı olan yerel gerilme-şekil değiştirme alanları söz konusudur. Örneğin malzeme yapısındaki boşluklar, kaynak hataları ve yorulma çatlakları gibi.

Kırılma genel anlamda iki şekilde oluşur; sünek kırılma ve gevrek kırılma. Sünek kırılma, çatlak ilerlemesi öncesinde ve sırasında önemli ölçüde plastik deformasyonla karakterize edilir. Kırılma yüzeylerinde de bu plastik deformasyon gözlenir. Gevrek kırılma, hızlı bir çatlak ilerlemesi ve mikro-deformasyonla karakterize edilir. Gevrek kırılmaya eğilim, azalan sıcaklık hızı, artan deformasyon hızı ve genellikle bir çentiğin yol açtığı üç eksenli gerilme durumlarında artar. Gevrek kırılma önceden uyardıktan oluştuğundan ve genellikle büyük felaketlerle sonuçlandığından istenmeyen ve mutlaka önlenmesi gereken bir kırılma türüdür.

İdeal kusursuz bir kristalin bağ mukavemeti, teorik olarak onun kırılma mukavemetine eşittir. Kırılma mekaniğinin amacı ise, çatlaklar, çentikler ve delikler gibi gerilme yoğunluğunu artıran hataları inceleyerek gerçek problemlere çözüm aramaktır.

Kırılma mekaniği hemen hemen tümüyle kırılmayla belirlenen hasarları inceler. Kırılmayla ilgili bir problemin ilk analizi Griffith tarafından camlardaki gevrek çatlakların ilerleyişinin izlenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Griffith basit bir enerji dengesi öngörmüştür, gerilme altındaki bir sistemde çatlak ilerledikçe elastik germe enerjisinde bir azalma olur, ki bu enerji de yeni çatlak yüzeylerinin oluşması için gerekli olan enerjidir.

Daha sonra Irwin G diye bir malzeme özelliği tanımlamıştır. G birim kalınlık başına çatlak uzunluğundaki birim artış için depolanan toplam enerjidir. G , şekil değiştirme enerji boşalma miktarı olarak adlandırılır. Ayrıca çatlak ucunda şekil değiştirme enerji boşalma miktarı dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Buna da kritik şekil değiştirme enerji boşalma miktarı G_c denir.

Yine Irwin sonraki çalışmalarında kırılma mekaniğinde çığır açmış, enerji yaklaşımının gerilme yoğunluğu ile eşdeğer olduğunu bulmuştur. Buradan gerilme şiddet faktörü (GŞF) diye tanımlanan K diye yeni bir malzeme özelliği tanımlamıştır. Gerilme şiddet faktörü K , çatlak civarında gerilme alanını belirleyen bir parametre olup, bu faktör malzemenin geometrik hali, yükleme şekli, çatlağın yeri ve oryantasyonuna bağlıdır. Buna göre çatlak ucunda gerilme dağılımı kritik bir değere ulaştığında kırılma oluşur. Böylece kritik gerilme şiddet faktörü veya yoğunluğu, K_c ortaya çıkmıştır.

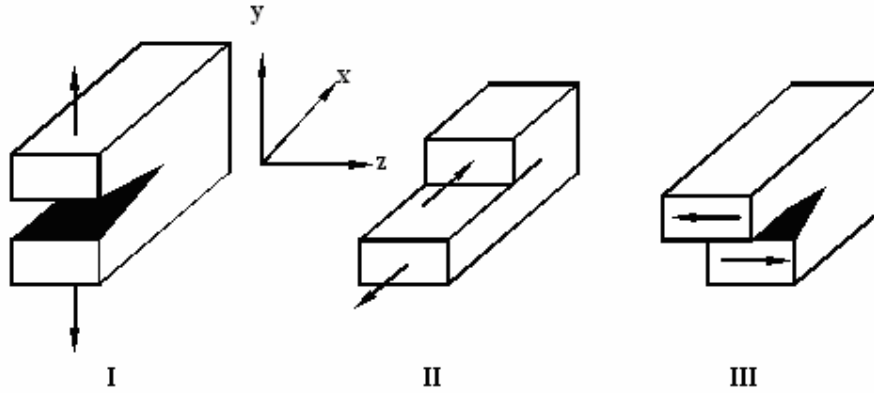
G ve K 'nin eşdeğerliliği Lineer Elastik Kırılma Mekaniğine (LEKM) temel oluşturmuştur. Çünkü tüm malzemeler için, bir çatlak ucunun etrafındaki ve yakınındaki gerilme dağılımı durumu her zaman aynıdır. Dolayısıyla K_c 'nin bilinmesiyle gerçek yapılarda ve belirli şartlar altında malzemede hangi hatalara izin verilebileceği saptanabilir. Ayrıca bu yaklaşımla yapılan deneyler sonucunda malzemelerin yorulma çatlak ilerleyişi veya gerilmeli korozyon çatlama gibi hassasiyetleri de bir dereceye kadar tahmin edilebilir.

LEKM, çatlak ucunda sınırlı plastik deformasyonun olduğu durumlarda geçerli olduğundan, çatlak ucunda önemli ölçüde plastik deformasyon söz konusu olduğunda Elastik Plastik Kırılma Mekaniği (EPKM) devreye girer. EPKM de, Wells'in çatlak açılması (COD) üzerine yaptığı çalışmalarla başlar. (Oğuz 1996)

5.1 Lineer Elastik Kırılma Mekaniği

Elastik cisimlerde çatlağın gerilme analizini yapabilmek için çatlak yüzeyinin bağlı hareketinin bilinmesi gerekir. Çatlak ilerleme davranışı üç tipte görülür. Bu üç tipten birini, ikisini veya üçünü de içerebilir. Şekil 5.1’de üç tip davranış görülmektedir.

Tip I, en çok görülen ve diğerlerine göre daha kritik olan açılma modudur. İki kırılma yüzeyi birbirine zıt yönde ve birbirine dik olarak ayrılır. II. tip kayma modunda, çatlak yüzeyleri x-z düzlemi üzerinde zıt yönde hareket ederler. III. Tip yırtılma modunda ise çatlak x-y ve x-z düzlemlerine göre ters simetrik olarak ilerler. İki kırılma yüzeyi birbirine göre çatlak önündeki bir doğru ile paralel yönde kayarlar.



Şekil 5.1 Çatlak ilerleme modları: (I): Açılma modu, (II): Kayma modu, (III): Yırtılma modu

İzotropik malzemelerde çatlak ucu civarında oluşan gerilme deformasyonları Irwin tarafından bulunmuştur (Irwin 1957). Daha önce de anlatıldığı gibi K, elastik gerilme alanının büyüklüğünü gösteren bir sabittir ve GŞF olarak adlandırılır. Boyutsal analizler, K'nın gerilmeyle doğrusal olarak, karakteristik bir uzunluğun da kareköküyle ilişkili olduğunu göstermiştir. Bu karakteristik uzunluk, çatlak boyudur ve gerilme yoğunluk faktörü;

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} f(a/W) \quad (5.1)$$

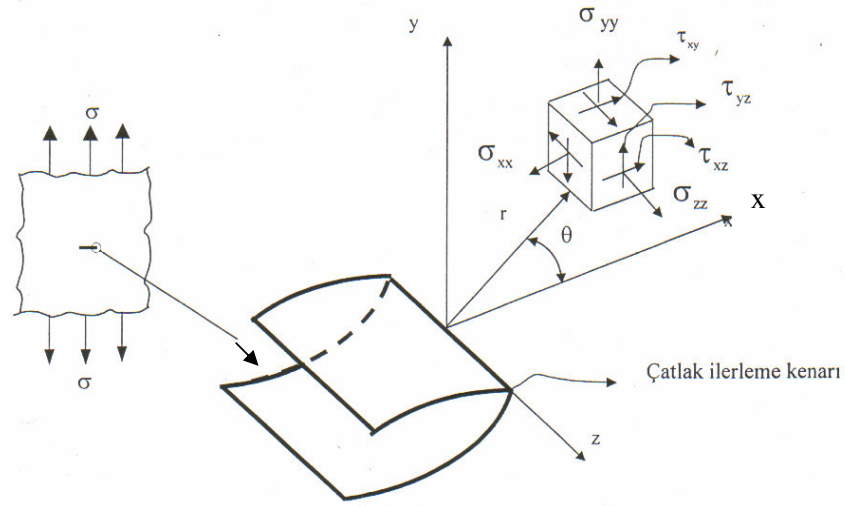
şeklinde verilir. Burada $f(a/W)$, numunenin ve çatlağın geometrilerine bağlı boyutsuz bir parametredir. Çatlak ucundaki GŞF, sonsuz genişlikteki bir numunede, her üç mod için aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$K_I = \sigma_I \sqrt{\pi a}, \quad K_{II} = \tau_{II} \sqrt{\pi a}, \quad K_{III} = \tau_{III} \sqrt{\pi a} \quad (5.2)$$

Burada, K_I , K_{II} ve K_{III} sırasıyla Mod I, Mod II ve Mod III' e göre GŞF dir. Mod I çatlak ucu gerilme bölgeleri dağılımı ve koordinat sistemi gösterimi Şekil 5.2' deki gibidir.

Çatlak ucundaki gerilmeler denklem 5.3' deki gibidir;

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left(\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \right) \\ \sigma_{zz} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \left(2\nu^* \cos \frac{\theta}{2} \right) \\ \tau_{yz} &= \tau_{zx} = 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$



Şekil 5.2 Kompozit malzemelerde çatlak ucu gerilme dağılımı

Şekil 5.2' deki gibi açılan çatlakın, r mesafesindeki noktadaki şekil değiştirmeleri aşağıdaki gibidir. Burada ν : Poisson oranı, σ_{xx} : x eksenindeki gerilme değeri, σ_{yy} : y eksenindeki gerilme değeri ve σ_{zz} : z eksenindeki gerilme değeridir. E : Elastisite modülü ve θ : r ' nin x eksenine yaptığı açıdır. u , v , w ise sırası ile x , y , z eksenlerindeki deplasmanlarıdır.

$$u = \frac{K_I}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} (1 + \nu) \left[(2\kappa - 1) \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$v = \frac{K_I}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} (1 + \nu) \left[(2\kappa + 1) \sin \frac{\theta}{2} - \sin \frac{3\theta}{2} \right]$$

$$w = -\nu^* \frac{K_I}{E} \quad (5.4)$$

$$\nu^* = \nu, \quad \kappa = \frac{(3-\nu)}{(1+\nu)} \quad (\text{Düzlem gerilme hali için})$$

$$\nu^* = 0, \quad \kappa = 3 - 4\nu \quad (\text{Düzlem şekil değiştirme hali için})$$

Kayma modu için gerilmeler;

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_{zz} &= \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \\ \tau_{yz} &= \tau_{zx} = 0 \end{aligned} \quad (5.5)$$

Deplasmanlar denklem 5.6' da ki gibi bulunur;

$$\begin{aligned} u &= \frac{K_{II}}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \\ \nu &= \frac{K_{II}}{E} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\ w &= 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

Yırtılma modu için gerilmeler ve deplasmanlar;

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \sigma_{yz} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \\ \sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \tau_{xy} = 0 \\ u &= v = 0 \end{aligned} \quad (5.7)$$

$$w = \frac{K_{III}}{E} \left[\frac{2r}{\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \quad \text{bulunur.}$$

5.1.1 Düzlem Gerilme ve Düzlem Şekil Değiştirme

Çatlak içeren bir numune gerilmeye maruz kaldığında çatlak geometrisi nedeniyle üç eksenli gerilmeler oluşur. Ancak çok ince numunede (levha şeklinde) x ve y yönlerinde gerilmeler mevcutken z, yani kalınlık yönünde gerilme yoktur ($\sigma_z = 0$) çünkü bu yön serbesttir. Böyle bir geometride gerilmeler iki eksenli (düzlemsel) olduğundan düzlem gerilme hali söz konusudur.

Kalın numunelerde numune yüzeylerinde yine düzlem gerilme hali söz konusudur ve numune üç boyutta deformasyona uğrar. z yönünde numune içine ilerledikçe üç eksenli gerilmeler ortaya çıkar. Ancak bu defa şekil değiştirme iki boyutludur; numune x-y düzleminde şekil değiştirir. Bunun da nedeni, numune içine ilerledikçe malzeme, z eksenli boyunca kendini çevreleyen malzeme tarafından tutulur ve z yönünde deformasyonu engellenir ($\varepsilon_z = 0$). Bu durumda da düzlem şekil değiştirme hali söz konusudur.

5.2 Elastik-Plastik Kırılma Mekaniği

Çoğu malzemelerde, LEKM ile kırılma davranışlarını izah etmek hemen hemen imkansız olup, alternatif bir kırılma modeli gereklidir. EPKM, lineer olmayan davranış (plastik deformasyon gibi) gösteren malzemeler için uygulanır. Elastik-plastik davranışı karakterize eden parametrelerden biri çatlak ucu açılma miktarı (crack tip opening displacement, CTOD), diğeri ise J-integraldir. CTOD ve J-integralin kritik değeri, boyuttan bağımsız kırılma tokluğu ölçümü ve büyük miktardaki çatlak ucu plastik davranışı verir. (Anderson 1991)

5.3 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.

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} \quad R > 0$$

$$\alpha = 2a/w \quad 2a/w < 0.95$$

olmak şartıyla aşağıda verilmiştir

$$\Delta K = (\Delta P/B) (\sqrt{[(\pi\alpha)/(2w)]} \sec[(\pi\alpha)/2] \quad (5.8)$$

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

Bu çalışmada farklı oryantasyon açılı çatlaklarda mod I ve mod II durumu olduğundan GŞF değişimleri ΔK_I ve ΔK_{II} aşağıdaki formüllerle hesaplanmıştır. (Xiangio Yan 2005)

$$\Delta K_I = (\cos^2 \theta) (\Delta P/B) (\sqrt{[(\pi\alpha)/(2w)]} \sec[(\pi\alpha)/2] \quad (5.9)$$

$$\Delta K_{II} = ((\sin 2\theta)/2) (\Delta P/B) (\sqrt{[(\pi\alpha)/(2w)]} \sec[(\pi\alpha)/2] \quad (5.10)$$

Burada θ çatlak açısını ifade etmektedir.

Deneyler sonucunda bulunan GŞF değişimleri ΔK_I ve ΔK_{II} 'nin, Paris-Erdoğan eşitliğinde kullanılarak, malzeme sabitleri olan A ve n sayılarının bulunabilmesi için, eşdeğer bir ΔK bulunması gereklidir. Bunun içinde Walker eşitliği kullanılabilir (Nicholas T. ve ark. 2005).

$$R_I = \Delta K_{\min} / \Delta K_{\max}$$

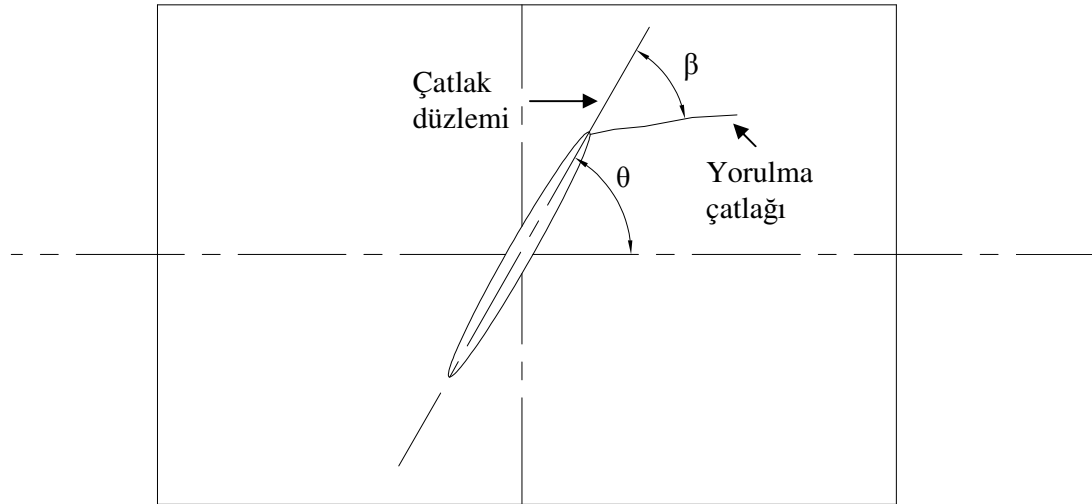
$$\Delta K_{I_{eş}} = \Delta K_I (1 - R_I)^{m-1} \quad \text{ve} \quad 0 < R_I < 0.7 \quad \text{şartı için } m=0,56$$

$\Delta K_{II\ e\grave{s}} = \Delta K_{II}$ alınmak suretiyle

$$\Delta K_{e\grave{s}} = \sqrt{(\Delta K_{I\ e\grave{s}})^2 + (\Delta K_{II\ e\grave{s}})^2} \quad (5.11)$$

Burada $\Delta K_{I\ min}$ ve $\Delta K_{I\ max}$: mod I e göre en büyük ve en küçük GŞF değişimlerini, $\Delta K_{I\ e\grave{s}}$: mod I e göre düzeltilmiş eşdeğer GŞF değişimini, $\Delta K_{II\ e\grave{s}}$: mod II ye göre düzeltilmiş eşdeğer GŞF değişimini, $\Delta K_{e\grave{s}}$: ise bileşik mod da ki toplam eşdeğer GŞF değişimini ifade etmektedir.

Eşdeğer bir ΔK bulunması için diğer bir yöntem ise, Nalla R.K. ve ark.'nın yaptıkları çalışmada kullandıkları yöntemdir. Bu yöntemde kink olayı dikkate alınarak GŞF değişim değerleri hesaplanmıştır. **Kink**: çatlak ilerlemesinin çatlak doğrultusunda gelişmeyip, herhangi bir β açısı kadar başka bir doğrultuda çatlağın ilerlemesi olayıdır. Bu yön değiştirme başlangıç çatlağının doğrultusundan $\pm \beta$ açısı kadar farklı yönlerde oluşabilir.



Şekil 5.3 Çatlak ilerlemesi sırasında meydana gelen Kink olayı

$$\Delta K_{I\ e\vartheta} = c_{11} \Delta K_I + c_{12} \Delta K_{II}$$

$$\Delta K_{II\ e\vartheta} = c_{21} \Delta K_I + c_{22} \Delta K_{II}$$

(5.12)

Burada c_{ij} : kink açısı olan α 'nın sole fonksiyonlarıdır (Nalla R.K. ve ark. 2002).

$c_{11} = c_{22} = \cos \alpha$ ve $c_{21} = c_{12} = \sin \alpha$ ise;

$$\Delta K_{I\ e\vartheta} = \cos \beta \Delta K_I + \sin \beta \Delta K_{II}$$

$$\Delta K_{II\ e\vartheta} = \sin \beta \Delta K_I + \cos \beta \Delta K_{II}$$

(5.13)

$$\Delta K_{e\vartheta} = \sqrt{(\Delta K_{I\ e\vartheta})^2 + (\Delta K_{II\ e\vartheta})^2}$$

eşitlikleri elde edilir.

Bu çalışmada çatlak ilerlemesi sırasında, farklı oryantasyon açılı çatlaklı numunelerde kink olayı meydana geldiğinden sole fonksiyonları kullanılarak $\Delta K_{I\ e\vartheta}$, $\Delta K_{II\ e\vartheta}$, ve $\Delta K_{e\vartheta}$ değerleri hesaplanmıştır.

5.4 Şekil Değiştirme Enerjisi Boşalma Miktarı (G)

Kırılma mekaniğinde, çatlak ucunda meydana gelen gerilme alanını tarif etmek için kullanılan, gerilme şiddet faktörü K , metaller ve seramikler gibi izotrop malzemeler için uygun bir parametredir. Yine kırılma mekaniğindeki yaklaşımlarda çatlak ilerlemesinin ilk başlangıcının tahmini için bir enerji kriteri olan şekil değiştirme enerjisi boşalma hızı, G veya gerilme şiddet faktörü K' nın bilinmesi gereklidir. Metaller ve seramikler gibi homojen malzemeler için her iki yaklaşımdan benzer sonuçlar elde edilse bile gerilme şiddet faktörü yaklaşımı yorulmalı çatlak ilerlemesi bulunan kompozitlerde sınırlı uygulamalarda kalmaktadır. (Devranjsinh 1997).

Enerji yaklaşımı ilk önce Griffith (1921) tarafından gevrek malzemeler için, birim çatlak boyu ilerlemesi yada birim çatlak alanı oluşturmak için gerekli olan

enerji olarak tarif edilmiştir. Kararsız çatlak ilerlemesi için aşağıdaki şart sağlanmalıdır.

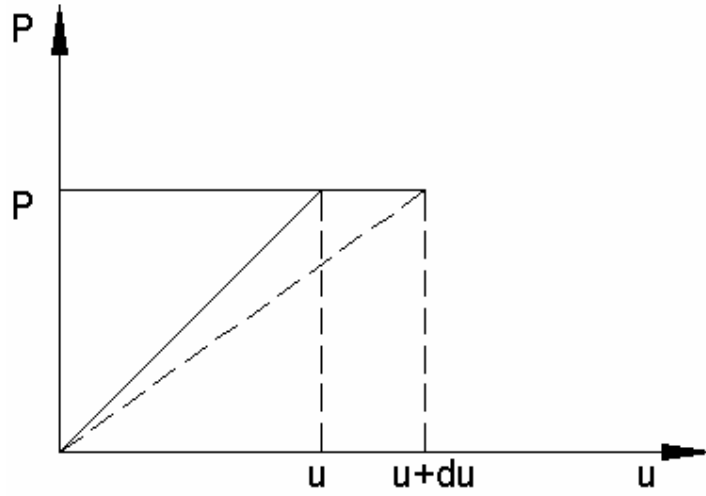
$$\frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} > \frac{dU'}{da} + \gamma$$

(5.14)

$$G > G_c$$

(5.15)

Eşitlik (5.14)' ün sol tarafı; cisme dışarıdan uygulanan W işi ile elastik şekil değiştirme enerjisi U ' nun farkının, eşitliğin sağ tarafındaki, kalıcı şekil değişimi U' ile yeni çatlak yüzeyi oluşturmak için gerekli enerji γ ' nin toplamından büyük olmalıdır. Eşitlik 5.16' da ki şekil değiştirme enerjisi boşalma miktarı G , gerilme şartlarına ve çatlak geometrisine bağlıdır. G_c ise G ' nin kritik değeri olup bir malzeme özelliğidir. Bu durumda G , kritik G_c değerini aştığı zaman kararsız çatlak ilerlemesi başlayacaktır. G_c değeri lineer olmayan çatlak ilerlemesinde ve hasar bölgesi boyutlarının numune boyutlarına göre çok küçük olduğu durumlarda geçerli ve faydalı bir parametredir.



Şekil 5.4 Sabit yük altında deplasman artışı ($P-u$) grafiği

Başlangıç çatlak boyu a olan lineer elastik bir malzemede, uygulanan yük neticesinde çatlak boyunun $a+da$ olduğunu varsayalım. Bu durumda G :

$$G = \frac{1}{W} \frac{dU}{da}$$

(5.16)

Burada; U numune üzerinde depolanan toplam enerji ve W ise numune genişliğidir. Sabit yük şartlarında, Şekil 5.3' de görülen üçgenlerin alanları farkına eşittir. Buradan;

$$\delta U = \frac{1}{2}(u + \delta u)P - \frac{1}{2}Pu = \frac{1}{2}P\delta u$$

(5.17)

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2}P(u + \delta u) - \frac{1}{2}Pu \\ &= \frac{1}{2}P\delta u \end{aligned}$$

burada P , uygulanan yük ve u ise bu yük altındaki deplasmandır. Yine grafikte $P-u$ eğrisinin eğiminin tersi ya da u/P , *kompliyans* olarak tanımlanır ve C ile gösterilir.

$$C = \frac{u}{P}$$

(5.18)

Buradan, sabit yük yada sabit deplasman şartlarında G aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$G = \frac{P^2}{2W} \frac{dC}{da}$$

(5.19)

Bunun yanı sıra G değerleri ayrıca ortotropik malzemeler için aşağıdaki formüllerden de hesaplanabilir. (Beaumont P. ve ark. 1990)

Mod I için G nin değeri;

$$G_I = K_I^{-2} \{ ((a_{22} a_{11})/2)^{1/2} [(a_{22}/a_{11})^{1/2} + ((a_{66} + 2a_{21})/2 a_{22})]^{1/2} \} \quad (5.20)$$

Burada

$$a_{11} = 1/E_1$$

$$a_{22} = 1/E_2$$

$$a_{21} = a_{12} = -\nu_{12}/E_1 = -\nu_{21}/E_2$$

$$a_{66} = 1/G_{12}$$

Mod II için ise G nin değeri;

$$G_{II} = K_{II}^{-2} \{ (a_{11}/\sqrt{2}) [(a_{22}/a_{11})^{1/2} + ((a_{66} + 2a_{12})/a_{11})]^{1/2} \} \quad (5.21)$$

Burada 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.

Toplam G değerleri de aşağıdaki formülden hesaplanabilir.

$$G = G_I + G_{II}$$

(5.22)

5.5 Çatlak Ucu Körlenmesi ve Çatlak Dallanması

Sünek davranış sergileyen ve çatlak içeren malzemeler yorulma yüküne maruz kaldığında yorulma çatlağının kararlı ilerlemesi durumunda, çatlağın ilerlediği yüzeylerde çizgili bir yüzey oluşur. Bu çizgili yüzey, çatlak ilerleme düzlemine dik küçük yükseltilerden oluşur. Şekil 5.5 yorulma çatlak ilerlemesi sırasında oluşan bu çizgili yüzeyin mekanizmasını ortaya koymaktadır. Çatlak ucu, yorulma yükü artarken körlenir ve gerilme bölgesinin etkisi ile çatlak küçük bir miktar ilerler. Çatlak ucunda oluşan küçük çatlaklar yorulma çatlağının dallanmasına sebep olur ve dallanmış çatlaklar çatlak düzlemi ile $\pm 45^\circ$ açı yapacak şekilde oluşurlar. Yorulma yükü azalırken dallanmış çatlaklar yön değiştirir ve çatlak ucu içeriye doğru katlanır. Bu aşama her bir yorulma çevrimde devam eder. Böylece her çevrim çatlak ilerleme yüzeyinde bir çizgi oluşturur. Kırılma yüzeyinde oluşan her bir çizgi arasındaki boşluk çatlak ilerleme mekanizmasına göre çatlak büyüme hızına (da/dN) eşittir.



Şekil 5.5 yorulma çatlağı ilerlemesi esnasında oluşan çatlak ucu körlenme ve çatlak dallanma mekanizması

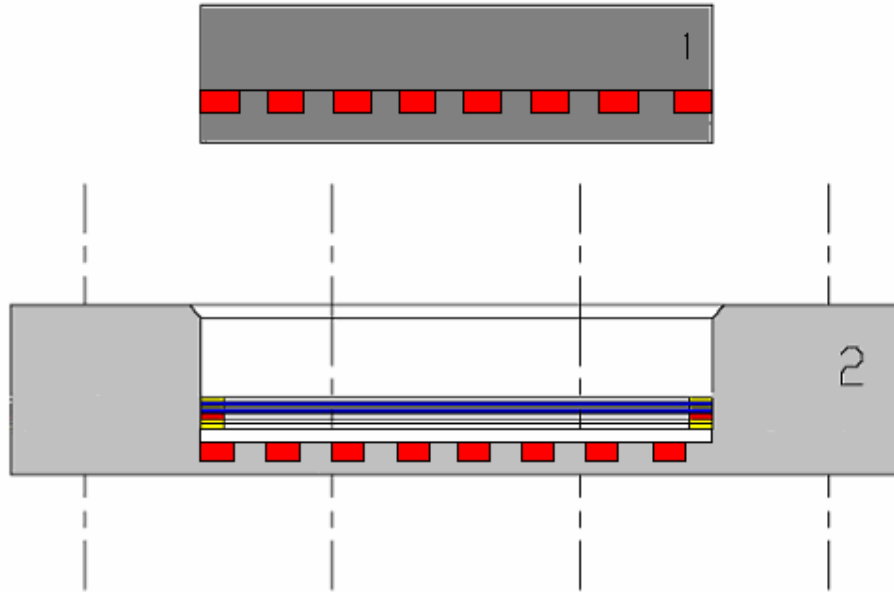
6. DENEYLER

6.1 Deney Numunelerinin Hazırlanması

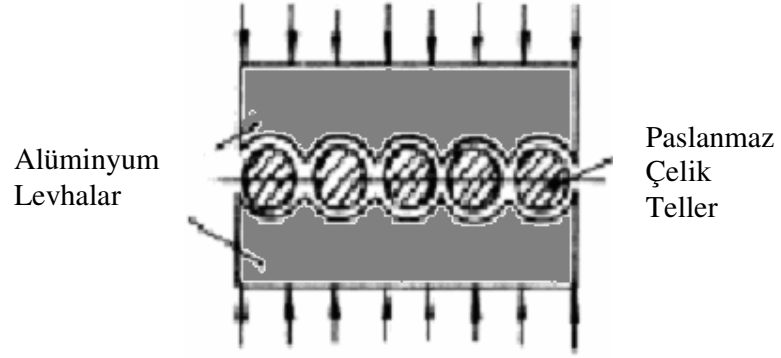
Öncelikle tek yönlü paslanmaz çelik tel takviyeli kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Malzeme üretiminde 40 ton kapasiteli hidrolik pres ve kalıptan oluşan düzenek hazırlanıp sıcak presleme yöntemi ile kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.1.'de görüldüğü gibi kalıp, asıl olarak iki parçadan meydana gelip alt ve üst kalıba kanallar açılarak bu kanallar içerisine ısıtıcı görevini yapacak rezistans teller yerleştirilmiştir. Bu rezistans teller istenilen sıcaklık için gerekli ısı kapasitesine kalıbı çıkarılabilecek kapasitededir.

Kompozit malzeme üretiminde fiber olarak 0.7 mm çapında Tablo 6.1. ve Tablo 6.3.'te özellikleri verilen AISI 302 tip paslanmaz çelik teller kullanılmıştır. Matris olarak Tablo 6.2 ve Tablo 6.3.'te özellikleri verilen 3 mm kalınlığında alüminyum levhalar kullanılmıştır.



Şekil 6.1 Kompozit malzeme üretiminde kullanılan kalıp 1) Üst kalıp (punch) 2) Alt kalıp



Şekil 6.2 Kompozit malzemenin üretimi

Tablo 6.1 AISI 302 (fiber) kimyasal özellikleri

	Cr	Si	Mn	Ni	P	S	Fe(%)	
	0.15	17.0	1	2	9	0.045	0.3	70.5

Tablo 6.2 AL 2024 (matris) kimyasal özellikleri

Fe	Cu	Si	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al(%)
0.4	4.0	0.05	0.3	1.5	0.07	0.25	0.15	93.28

Tablo 6.3 Al 2024 ve AISI 302 mekanik ve fiziksel özellikleri

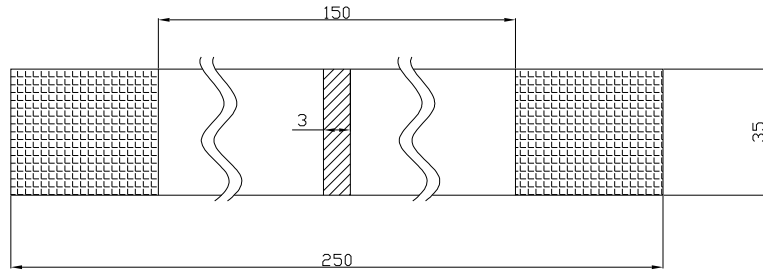
Malzeme	Al 2024	AISI 302
Çekme mukavemeti (σ_u)	186.56 MPa	515 MPa
Akma mukavemeti(σ_{AK})	76 MPa	205 Mpa
Poisson oranı (ν)	0.33	0.29
Elastisite modülü (E)	72.56 GPa	193 GPa
Yoğunluk (ρ)	2.8 kg/m ³	8 kg/m ³

İlk aşamada Al levhaların birinin üzerine vargel tezgahında 2 mm aralıklar ile 1 mm derinliğinde kanallar açılmıştır. Bu kanallara paslanmaz çelik teller levha boyunda kesilerek yerleştirilmiştir. Daha sonra Şekil 6.2.'de görüldüğü gibi diğer Al levha üzerine monte edilerek alt kalıbın içine yerleştirilerek ve üst kalıp kapatıldı. Isıtıcılar yardımı ile 585-600°C sıcaklık aralığına ısıtılmıştır. Kalıp bu sıcaklığa ulaştığında kalıbın sıcaklığı bu aralıkta kalacak şekilde ısıtma işlemi devam ederken aynı zamanda 35 tonluk bir yük uygulanmıştır. Bu işlem 45 dakika devam ettikten sonra kalıp havada soğumaya bırakılmış ve kalıbın soğumasının ardında kompozit malzeme kalıptan çıkartılmıştır.

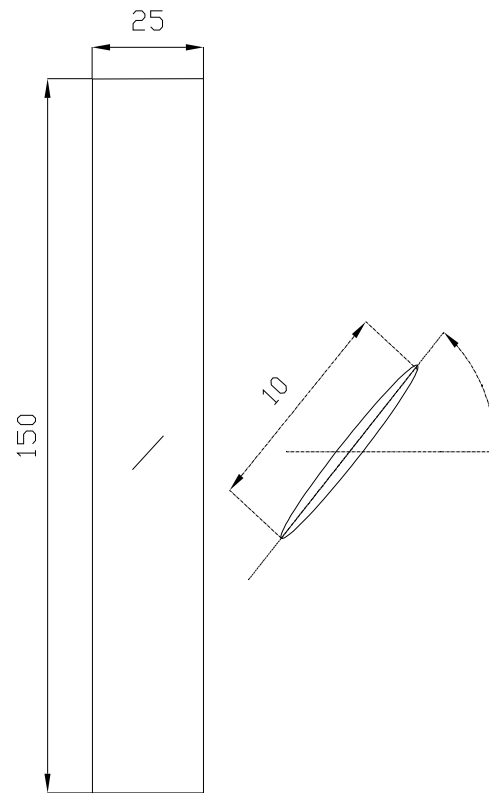
Kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin bulunması için ASTM E 399 standardına göre Şekil 6.3.'de verilen numuneler hazırlandı.

Yorulma deneyleri için ASTM E 647 standardına göre Şekil 6.4. de şematik resmi ve boyutları verilen numuneler hazırlandı. Bu numunelerin merkezine 2a=10mm boyunda merkezi çatlaklar açıldı. Çatlakların açılmasında elektro erozyon tezgahı kullanılmış ve kesme işlemi sırasında 0.2mm çapında tel kullanılmıştır. Bu çatlaklar x eksenine 0°, 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° açılar yapacak şekilde açılmıştır.

Çatlakları açmadan önce numune üzerine 10 mm boyunda çatlağın yeri özel kalemle işaretlenmiştir. Daha sonra elektroerozyon tezgahında 0.2mm çapında tel kullanılarak 1mm genişliğinde kalınlık boyunca merkez çatlakları açılmıştır.



Şekil 6.3 Çekme testi deney çubuğu ve ölçüleri

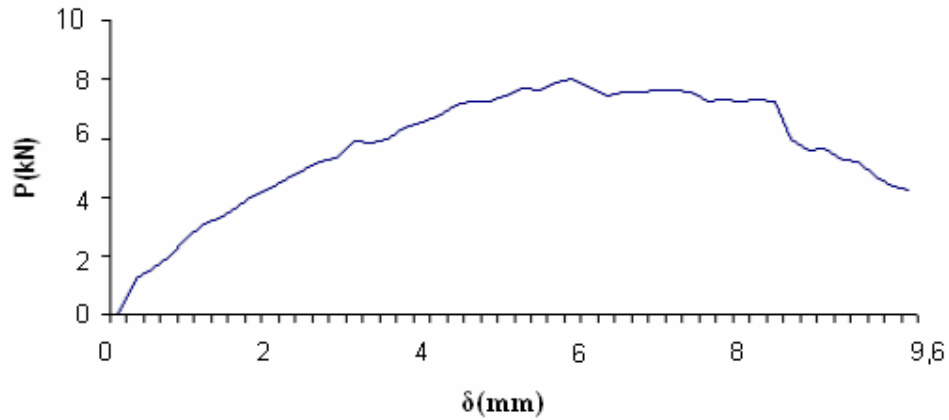


Şekil 6.4 Yorulma deneylerinde kullanılan deney çubuğu ve ölçüleri

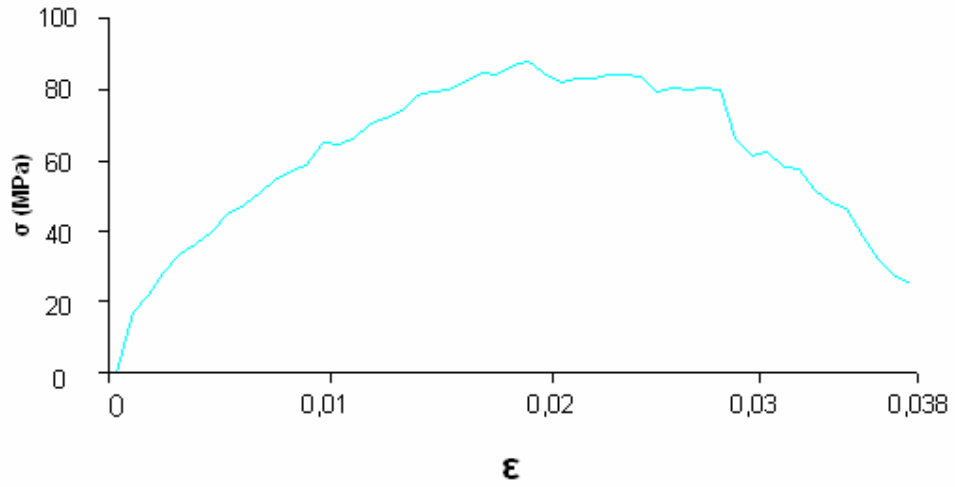
6.2 Çekme Deneyi

Şekil 6.3. de görüldüğü gibi numuneler hazırlanarak LLOYD INSTRUMENTS T50 K model çekme cihazında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler 0.5 mm/dk ilerleme hızında oda sıcaklığında yapılmıştır.

Kompozit malzemeye ait kuvvet-uzama ($P-\delta$) ve gerilme-şekil değiştirme miktarı ($\sigma-\varepsilon$) grafikleri sırası ile şekil 6.5. ve şekil 6.6. da verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi $\sigma-\varepsilon$ eğrisinin muhtelif yerlerinde dalgalanmalar görülmektedir. Gerilmenin 60 MPa ile 65 MPa aralığındaki dalgalanmalar beklenildiği gibi fiberin kopmaya başladığı safhadır. İlk telin kopmasının ardından ikinci telin kopmasına kadar geçen zamanda gerilme değeri 85 Mpa kadar ulaşmış ve ikinci telin kopması ile azalmaya başlamıştır. Grafikte görülen her dalgalanma fiberlerin koptuğu anı göstermektedir. Daha sonra metal matrisin etkisiyle sünek davranış ve kopma gerçekleşmiştir.



Şekil 6.5 Kompozit malzemeye ait kuvvet-uzama grafiği



Şekil 6.6 Kompozit malzemeye ait gerilme-şekil değiştirme grafiği

Daha sonra başka numuneler yatay ve dikey konumda çeyrek köprü oluşturacak şekilde 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 tablo 6.4. de verilmiştir.

Tablo 6.4 Kompozit malzemenin mekanik özellikleri

Kompozit Malzemenin Mekanik Özellikler	
E_1	76000
E_2	47000
ν_{12}	0.54
Akma mukavemeti (σ_{AK})	62 MPa
Çekme mukavemeti (σ_u)	84 MPa

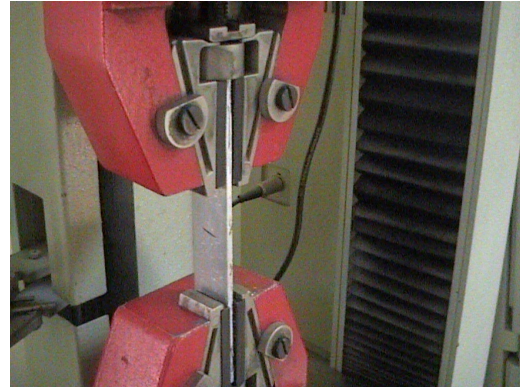
6.3 Yorulma Deneyleri

Yorulma deneyleri için Şekil 6.5 de görülen ve ASTM E 647 standardına göre hazırlanan numunelere x eksenine 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° ’lik açı yapan konumlarda merkezi çatlaklar açıldı. Bu çatlaklı numuneler yorulma deneylerine tabi tutuldu. Yorulma deneyleri için Şekil 6.7.’de görülen KOSGEB Konya Merkez Laboratuvarında bulunan Testometric Micro 500 marka elektro-mekanik ve dijital LCD ekranlı tam otomatik cihaz kullanılmıştır. Cihazın kapasitesi 3000 kg olup TSE tarafından her yıl kalibrasyonu yapılan ve kontrol edilen bir cihazdır. Cihaz üzerinde yorulma deneyleri 0,1 mm/dk hassasiyetli hızlarla ve 1 N hassasiyetli yük uygulamasıyla yapılabilmektedir.

Yorulma deneyleri ASTM E 647 standardı doğrultusunda, $f=0.65$ Hz’ lik bir frekans ve $R=0.1$ gerilme oranında yapılmıştır. Test cihazında frekans, numunenin bağlandığı aparatın ilerleme hızı ile kontrol edilmektedir. $f=0.65$ Hz’ lik bir frekans, 40 mm/dk lık bir hız uygulanarak elde edilmiştir. Ayrıca maksimum 2000 N ve minimum 200 N’ luk çekme yük değerleri kullanılarak $R=0.1$ gerilme oranı



(a)



(b)

Şekil 6.7 a) Yorulma deneylerinde kullanılan test cihazı **b)** Numunenin cihaza bağlantı şekli

sağlanmış, böylece tekrarlı yükleme ile yorulma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Burada maksimum gerilme için akma dayanımının 0.5'i alınmıştır

ASTM E 647 standartlarına göre seçilen numune boyutları düzgün dağılmış 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 çatlağı oluşuncaya kadar yorulmaya devam edilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen çatlak ilerleme miktarı a ve çevrim sayıları N değerlerinin ortalaması alınarak farklı çatlak açılarına sahip numunelerin a ve N değerleri bulunmuştur.

Normal yorulma deneyi yapılırken çatlağın ilerleme miktarı 0.01 mm hassasiyetli ve 10 kez büyütme el mikroskobu ile ölçülmüştür.

Belirlenen çevrim değerlerinde ilerleyen çatlak boyu ölçülürken o andaki çatlak konumunu ve çatlak ağzı 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.

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

7.1 Giriş

Lineer Elastik Kırılma Mekaniği kullanılarak gerilme şiddet faktörü (GŞF) değişim miktarlarının (ΔK_I ve ΔK_{II}) hesaplanmasında ilk olarak eşitlik (5.9) ve eşitlik (5.10) da verilen formüller kullanılmıştır. Malzeme sabitleri olan A ve n katsayılarının bulunması için, Paris-Erdoğan eşitliği olarak bilinen ve eşitlik (4.6) da verilen ΔK 'nın hesaplanması gereklidir. Bunun için 5. bölümde anlatılan Walker eşitlikleri ve Sole fonksiyonları kullanılarak ($\Delta K_{I_{eş}}$ ve $\Delta K_{II_{eş}}$) değerleri hesaplanmıştır. Sonra da eşitlik (5.11) den ($\Delta K_{eş}$) değerleri hesaplanmıştır. Sole fonksiyonlarından elde edilen $\Delta K_{I_{eş}}$, $\Delta K_{II_{eş}}$ ve $\Delta K_{eş}$ değerleri her bir çatlak açısı için EK I'de verilmiştir. Çatlak ilerlemesi sırasında kink olayı meydana geldiğinden ve Sole fonksiyonları da kink açısının fonksiyonları olduğundan grafiklerde bu eşitlikler kullanılmıştır. Ayrıca enerji boşalma miktarı değişimi ΔG değerleri de eşitlik 5.22 den hesaplanmıştır. Her bir çatlak açısı için grafikleri çizilen ΔG değerleri EK I'de verilmiştir.

Üzerinde x eksenini ile $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ve 75° çatlaklar bulunan numunelere Elasto-Plastik Kırılma Mekaniğinde (EPKM) kullanılan ve çatlak içeren bir malzemenin kırılma davranışını karakterize eden bir yöntem olan kompliyans yöntemi uygulanarak ΔG değerleri hesaplanmıştır. Bu yöntemde, sabit yorulma yükü etkisi altındaki çatlaklı numunede belirli çevrim sayısı aralıklarında maksimum (P_{max}) ve minimum (P_{min}) yorulma yüküne karşılık gelen çatlak ağzı açılma miktarı (COD) değerleri el mikroskobu yardımı ile ölçülerek kaydedilmiştir. Ayrıca deney esnasında kamera ile yapılan kayıtlar bilgisayar ortamına aktarılmış ve Auto-Cad programı kullanılarak kamera kayıtları üzerinden COD değerleri ölçülmüştür. Deney esnasında ölçülen değerler ile bilgisayar ortamında ölçülen değerler karşılaştırılarak ölçümün hassasiyeti artırılmış ve oluşan hatalar giderilmiştir. Elde edilen yüke karşılık . COD değerleri ile P-COD grafiği çizilmiştir. Bu grafikte aynı çevrim sayısında maksimum ve minimum yüke karşılık gelen COD değerleri bir çizgi ile birleştirilmiştir. Eşitlik (5.18.)'e göre, $C=\Delta u/\Delta P$, bu çizginin eğiminin tersi yani

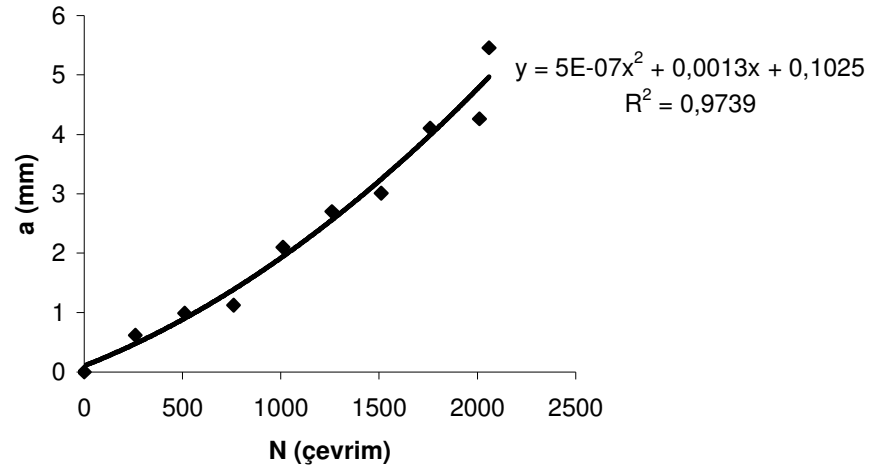
çatlak açılma miktarının yüke oranı hesaplanarak kompliyans (C) değerleri elde edilmiştir. Elde edilen kompliyans değerleri ile yorulma çatlak ilerlemesi (a)değişimi bir Excel programı kullanılarak eğri haline uydurulmuştur. Elde edilen denklemin türevi alınarak dC/da elde edilmiş ve eşitlik (5.20) de kullanılarak ΔG değerleri elde edilmiştir. Böylece EPKM kullanılarak üzerinde farklı açılarda çatlaklar bulunan her bir numunenin kırılma davranışı karakterize edilmiştir.

Bu çalışmada, sabit yorulma yükü etkisi altındaki üzerinde farklı açılarda kalınlık boyunca çatlaklar bulunan numunelere iki farklı kırılma mekaniği yöntemi uygulanmıştır. Her iki yöntem ile bulunan ΔG değerleri her bir çatlak için aynı grafik üzerinde gösterilerek eğrilerin ilişkisi tartışılmıştır.

7.2 0° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi

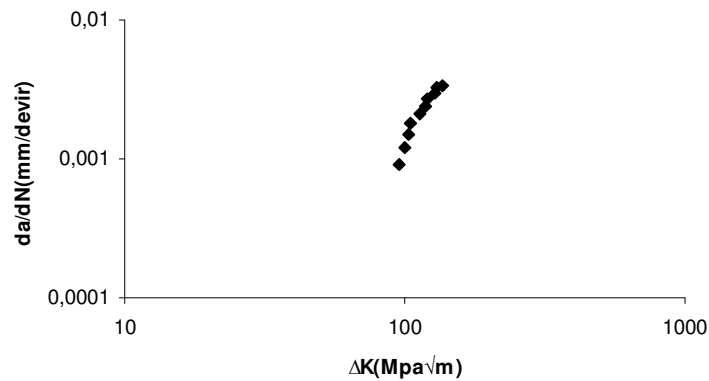
Ortasında x eksenini ile 0° açı yapan kalınlık boyunca açılmış çatlak bulunan kompozit numuneler yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Numunelerin ön yorulma çatlak $N=490$ çevrimde 0.1 mm olarak tespit edilmiştir.

Yorulma deneyi yapılırken her 250 çevrimde seyyar el mikroskobu yardımıyla çatlak ilerleme miktarı ölçülmüştür. Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.1. de verilmiştir. Bu grafikten çatlak 1760 çevrim sayısına kadar kararlı olduğu, 1760 çevrimden sonra hızlandığı görülmektedir. Numuneler ortalama 2050 çevrimde ve $\Delta a=5.5$ mm çatlak ilerleme miktarında kırılmıştır. Ayrıca çevrim ve çatlak ilerleme miktarları EK I a da verilmiştir. Şekil 7.1'de görülen grafikten Excel programı kullanılarak eğri uydurma yöntemi ile elde edilen $a(N)= 5E-07x^2+0,0013x+0,1025$ denkleminin türevi alınarak çatlak ilerleme hızı (da/dN) bulunmuştur.



Şekil 7.1 0° çatlaklı kompozit malzemenin a 'nın N ile değişimi

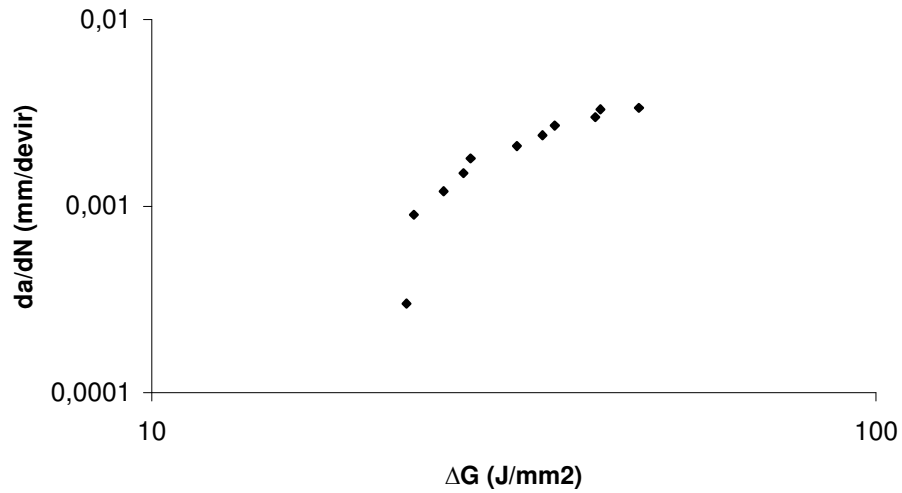
Şekil 7.2 de 0° açılı çatlaklı numunenin yorulma neticesinde çatlak ilerleme hızının (da/dN) ve ΔK_I 'e göre değişiminin grafiği logaritmik eksenle gösterilmiştir. Burada ΔK_I değerleri eşitlik 5.9 dan hesaplanmıştır. Başlangıçta $a_0=5.13$ mm ve $N=490$ çevrim de $\Delta K_I=94.87 \text{ MPa}\sqrt{m}$ iken, stabil olmayan çatlak ilerleme anında ($a=10,5\text{mm}$ de) $\Delta K_I=137.23 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. 0° açılı çatlaklı numunede ayrılma modunda (mode I) hasar oluştuğundan sadece ΔK_I değerleri bulunmuş ve değerlendirmeler buna göre yapılmıştır.



Şekil 7.2 0° açılı çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nin ΔK_I ile değişimi

Şekil 7.2 incelendiğinde ΔK_I artarken çatlak ilerleme hızı da/dN arttığı görülmektedir. Çatlak ilerleme hızı başlangıçta hızla artarken kopmaya doğru bir miktar azalma eğilimi göstermiştir. Eğrinin eğiminin azalmasının sebebi olarak çatlak ucundaki gerilme bölgesinin büyüklüğünün artması ve dolayısı ile matrisin plastik olarak şekil değişimi sebep olmuştur.

Şekil 7.3 de 0° açılı çatlaklı numunede yorulma neticesinde çatlak ilerleme hızının (da/dN) şekil değiştirme enerji boşalma miktarı değişimi (ΔG) ile değişmesinin grafiği gösterilmiştir. ΔG değerleri eşitlik (5.22) den hesaplanarak başlangıç çatlak $a_0=5.13$ mm ve $N=490$ çevrim de ΔG değeri 22.5 J/mm^2 iken, stabil olmayan çatlak ilerleme miktarında ($a=10.5$) ve $N=2550$ 47 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. ΔG 'nin değişim değerleri "EK I a" da verilmiştir.



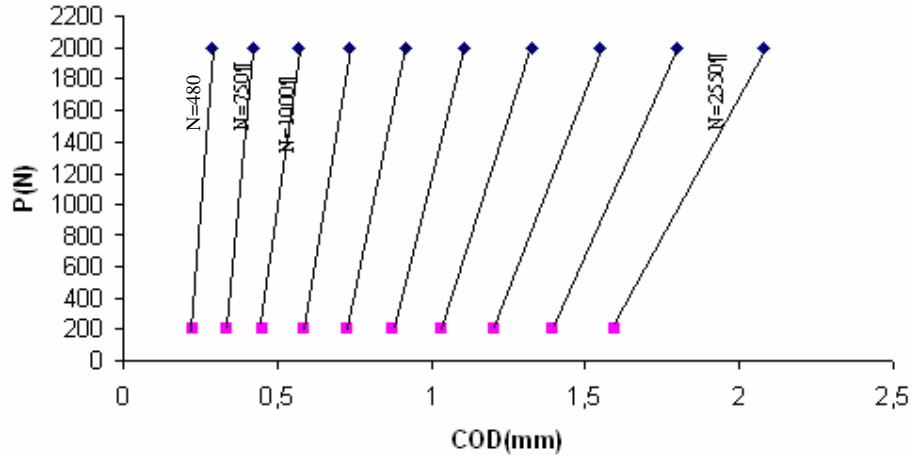
Şekil 7.3 0° çatlaklı kompozit malzemenin da/dN 'nin ΔG ile değişimi

Şekil 7.3 incelendiğinde 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. Eğrinin eğiminin azalmasında en büyük etken çatlağın fiber ile karşılaşması sonucu fiber aşmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyması ve sonucunda çatlak ilerleme hızının düşmesidir.

7.3 0° Açılı Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG 'nin İncelenmesi

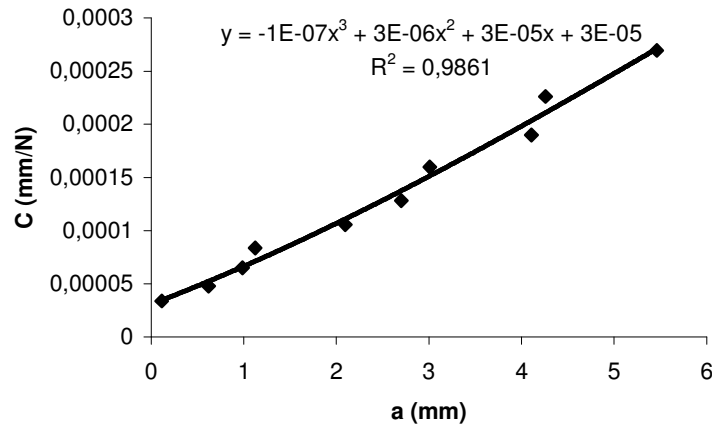
Ortasında x eksenini ile 0° açı yapan çatlaklı numuneye elasto-plastik kırılma mekanizmasında kullanılan ve çatlaklı bir numunenin kırılma davranışını karakterize eden yöntemlerden biri olan kompliyans yöntemi uygulanmış ve bu yöntem ile bulunan ΔG değerleri LEKM ile bulunan ΔG değerleri ile karşılaştırılmıştır. Bu yöntemde çatlak ağzı açılma miktarı (COD) ile çatlak ilerleme davranışı ilişkilendirilmiştir. Öncelikle her 250 çevrimde maksimum (2000N) ve minimum (200N) yorulma yüklerine karşılık gelen çatlak ağzı açılma (COD) miktarları bir el mikroskobuyla ölçülmüş ve dijital kamera ile de kayıt yapılmıştır. Sonra yapılan bu kayıtlarla ölçülen değerler kontrol edilmiştir. Deney esnasında ölçülen değerlerle kameradan elde edilen değerler arasında fark varsa bu farklılıklar giderilmiş ve şekil 7.4 de görüldüğü gibi P-COD grafiği çizilmiştir. Bu grafikte 0° çatlaklı numune için COD değerlerinin yorulma yükü ile değişimi gösterilmiştir. Çatlak ilerlemeye başladığında maksimum yorulma yükü değerinde ($P_{max}=2000$ N) $\Delta COD=0,27$ mm ölçülürken, minimum kuvvet değerinde ($P_{min}=200$ N) $COD=0,22$ mm ölçülmüştür. Stabil olmayan çatlak ilerlemesinin başladığı kırılma anında ise maksimum yorulma yükü değerinde $\Delta COD=2.078$ mm ve minimum yorulma yükü değerinde $\Delta COD=1.593$ mm ölçülmüştür.

Sabit yorulma yükü ve sabit çevrim aralığında ölçülen COD değerleri grafik haline getirilmiş ve P-COD grafiği çizilmiştir. Bu grafikten aynı çevrim sayısında elde edilen P_{max} ve P_{min} değerlerine karşılık gelen COD değerleri bir eğri ile birleştirilmiştir. Bulunan her bir eğrinin eğiminin tersi ya da COD/P olan ve kompliyans olarak tanımlanan, C değerleri eşitlik (5.18) yardımı ile hesaplanmıştır.



Şekil 7.4 0° çatlaklı numunenin P'nin COD ile değişimi

Elde edilen kompiyans değerleri ile aynı çevrim sayısında ölçülen çatlak ilerleme miktarı değerleri kullanılarak şekil 7.5 te görüldüğü üzere kompiyans ve çatlak ilerleme miktarı (C-a) grafiği oluşturulmuştur. Bu grafiğe Excel programı yardımıyla eğri uydurulmuş ve $C(a) = -1E-07x^3 + 3E-06x^2 + 3E-05x + 3E-05$ denklemi bulunmuştur. Bu denklemin türevi alınarak dC/da değerleri elde edilmiş ve eşitlik (5.19) da kullanılarak ΔG değerleri hesaplanmıştır.

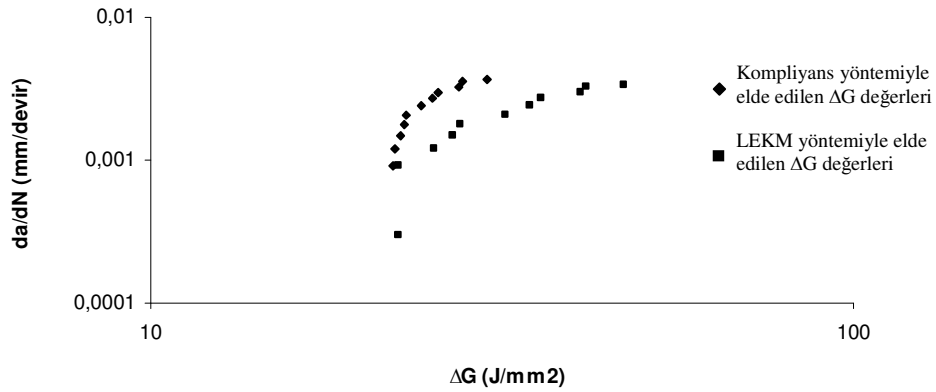


Şekil 7.5 0° çatlaklı numunelerde C'nin a ile değişimi

Şekil 7.6 da yatayla 0° açılı yapan çatlaklı numune için kompiyans yöntemiyle ve LEKM kullanılarak elde edilmiş da/dN - ΔG grafikleri görülmektedir. Kompiyans yöntemiyle elde edilen ΔG değerleri eşitlik (5.19) dan hesaplanmıştır. Başlangıçta $\Delta G = 22.14 \text{ J/mm}^2$ iken kırılma anında ise $\Delta G = 30.13 \text{ J/mm}^2$ olarak bulunmuştur. Grafikten görüldüğü gibi ΔG değerleri başlangıçtan kırılma anına kadar artış göstermiştir. Giderek artan ΔG değerleri yorulma çatlakının ilerleyebilmesi çevrim sayısı arttıkça daha çok enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bunun sebebi çatlakının önündeki fiberlerin çatlakının ilerlemesini yavaşlatması ve çatlakının ilerleme düzlemi önündeki matriste gerilme yoğunluğunun giderek artmasıdır.

LEKM kullanılarak elde edilen ΔG değerleri eşitlik (5.22) kullanılarak hesaplanmıştır. Yine LEKM kullanılarak oluşturulmuş ve şekil 7.6 da verilen 0° çatlaklı numune için da/dN - ΔG grafiği incelenecek olursa, başlangıçta $\Delta G = 22.5 \text{ J/mm}^2$ iken kırılma anında ise $\Delta G = 47 \text{ J/mm}^2$ olarak bulunmuştur.

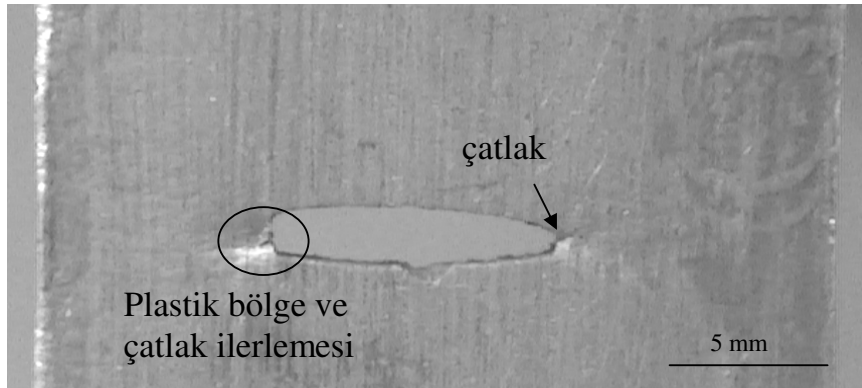
Sonuç olarak iki yöntem arasında başlangıçta uyumsuzluk 1.5 % iken kırılma anında 35.9 % olmuştur. İki yöntem arasındaki uyumsuzluğun artmasının sebebi matrisin gerilme yoğunlaşmasının olduğu bölgede plastik olarak davranması ve böylece enerji yutmasıdır. Bu davranış LEKM dikkate alınmaz çünkü gevrek malzemeler için kullanılır.



Şekil 7.6 0° çatlaklı numunelerde da/dN 'nin ΔG ile değişimi

7.4 0° Açılı Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

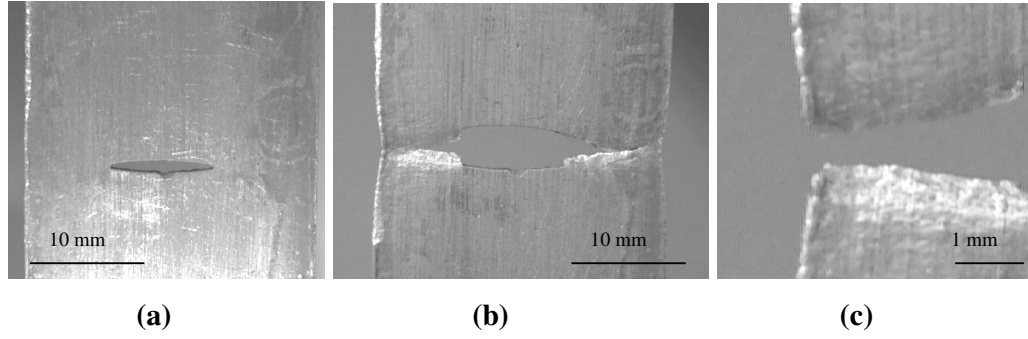
Burada x eksenine ile 0° açı yapan çatlaklara uygulanan yük çatlak düzlemine dik olduğundan çatlakların ilerlemesi hızlı ve hasar diğer çatlaklı numunelere göre düşük yorulma çevrimlerinde gerçekleşmiştir. Hasar mekanizması incelenecek olursa, yorulma deneyinin başlangıcından ön yorulma çatlaklarının oluştuğu çevrim sayısına kadar çatlak ağzında gözle görülebilen açılma gözlenmiştir. Ön yorulma çatlaklarının oluşmasının ardından yorulma çatlakları matrisin plastik olarak şekil değiştirdiği bölgeden kararlı bir şekilde ilerlemiştir. Bu sırada çatlak ağzında açılma devam etmiştir. Daha sonra çatlak fibere ulaştığında çatlakların ilerleme hızı azalmış ancak çatlak ağzı açılmaya devam etmiştir. Çatlak fiberin bulunduğu bölgeyi geçene kadar çatlakların önündeki matriste plastik gerilme bölgesi büyümüştür. Çatlak önündeki fiberi kesmeden aşmış ve ilerlemeye devam etmiştir. Bu sırada çatlakların ilerlediği düzlem doğrultusunda matrisin dış kenarlarında genişlik yönünde daralma yani boyun verme başlamıştır. Bu sırada çatlak ağzındaki açılma devam etmektedir.



Şekil 7.7 0° çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi

Çatlak ilerlemesi yorulma çevrim sayısının artışıyla birlikte $a=10.5$ mm seviyesine gelinceye devam etmiş ancak bu değerden sonra çatlak ilerlemesi süratle artmış bu andan itibaren fiberler birkaç saniye aralığında ardı ardına kopmuş ve çatlak kararsız olarak ilerlemiştir. Bu sırada kompozit malzemede boyun verme iyice belirginleşmiş ve çatlağın kararsız ilerlemesi sırasında çatlak ağzı da kararsız olarak açılmıştır. Kırılma yüzeyi incelendiğinde çatlağın kararlı olarak ilerlediği bölgeye kadar kırılma yüzeyinde küçük aralıklar ile oluşmuş çizgi şeklinde yükseltiler görülmüştür. Ayrıca bazı fiberlerin fiber matris ayrılması sonucu sıyrıldığı görülmüştür.

Yukarıdaki gözlemlere dayanarak çatlak ilerleme mekanizması çekme yükü etkisi altındaki metal matrisli kompozitlerde, fiberlerde oluşan kayma gerilmesi yoğunluğu ile açıklanabilir. Üzerinde çatlak bulunan tek yönde takviye edilmiş metal matrisli kompozit bir malzeme çekme yüküne maruz bırakıldığında çatlak nedeniyle, çatlak ucunda çekme gerilme yoğunlaşması ve fiberlerde ise kayma gerilmeleri meydana gelir. Fiberlerde oluşan kayma gerilmesi matrisin elastik olarak şekil değiştirmesine fiber-matris arayüzey ayrılmasına ve matrisin kayma akmasından gerilmesinden büyük olduğu taktirde matris kırılmasına sebep olur. Bu kabul ile, çatlağın fiberi kesmeden geçtiği düşünülürse fiber ile matris arasında arayüzey ayrılması olduğu ve dolayısı ile çatlağın fiberi kesmeden ilerlediği belirlenmiştir. Bu durumda ilk olarak çatlağın ilerlediği çatlak düzlemi doğrultusunda matrisin deformasyona uğradığı ve daha sonra fiberi geçtiği gözleminden yararlanarak, çatlak ucundaki gerilme yoğunluğunun önce matrisin kayma akma gerilmesine ulaştığını ve matrisin bu bölge içerisinde plastik olarak şekil değiştirdiği daha sonra ise artan gerilme yoğunluğunun fiber-matris arayüzey dayanımına ulaşarak fiber-matris arayüzey ayrılmasına sebep olduğu ve böylece çatlağın fiberi kesmeden ilerlediği sonucuna ulaşılmıştır. Çatlağın fiberi aştığı esnada matris plastik olarak davranmakta, fiber ise henüz elastik olarak şekil değiştirmektedir. Bundan dolayı yüksek şekil değiştirme oranına sahip olan matris fiberlerin üzerine sıvanmıştır. Buradan çatlağın ilerlemesi esnasında fiberi kesmediği fiber köprülenmesinin çıktığı ve matrisin kayma akma dayanımının arayüzey dayanımından küçük olduğu sonucu elde edilmiştir. Bu mekanizmalar numunenin kırılmasını geciktirmiştir ve numune çatlak ilerlemesine daha çok direnç göstermiştir.



Şekil 7.8 0° çatlak geometrisine sahip numunenin başlangıç ve kırılma sonrası resimleri

- a-) Numunenin deney başlangıç çatlak durumu
- b-) Kopma sonrası malzeme hasar resmi
- c-) Çatlağın ilerlediği bölge

Çatlağın önündeki matrisin plastik olarak şekil değiştirdiği ve fiber-matris ayrılmasının gözlemlendiği bölge artan gerilme yoğunluğu sebebiyle büyümüştür. Matrisin plastik şekil değişimi, bu bölge dışında matrisin elastik olarak davranması sebebiyle, genişlik doğrultusunda değil kalınlık doğrultusunda ortaya çıkmış ve matrisin bu bölgede kalınlığı azalmıştır. Şekil 7.8 (b)'de görüldüğü gibi numunenin kenarlarından boyun vermesinin sebebi ise deney esnasında boyca uzamasından kaynaklanmaktadır. Çatlak açısının 0° olmasından dolayı sadece Mod I de hasar oluşmuş ve çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca ve kopuncaya kadar devam etmiştir. ve aniden numune kopmuştur.

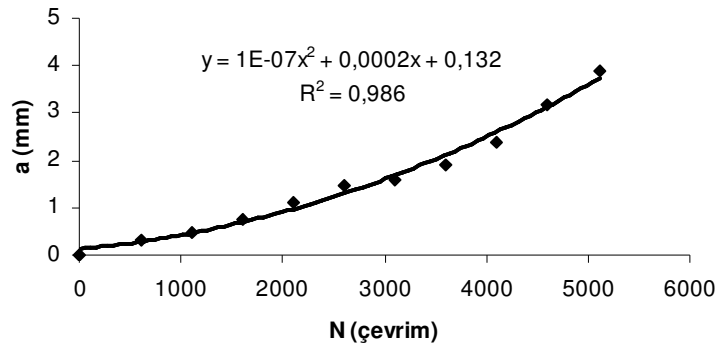
7.5 15° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi

Ortasında yatayla 15° lik açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneler $R=0.1$ gerilme oranında ve $f=0.65$ frekansta yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Öncelikle bu numune de yorulma deneyi yapabilmek için yorulma ön çatlağı açılmıştır. Çatlak 1480 yorulma çevrim sayısında 0.1 mm ye ulaştığında yorulma durdurulmuştur. Daha sonra normal yorulma deneyine geçilmiştir.

Çatlak ilerleme miktarı her 500 çevrimde seyyar el mikroskobuyla ölçülmüştür. Ayrıca her 500 çevrim sırasında çatlakın durumu dijital kamerayla fotoğraf ve videoları çekilerek kayıt edilmiştir. Daha sonra bu video ve fotoğraflar kullanılarak bilgisayar ekranı üzerinde çatlak ilerleme miktarı ölçülmüştür. Böylece çatlak ilerleme miktarı, hem el mikroskobu hem de bilgisayarda ki görüntüler kullanılarak iki yöntemle de bulunmuş ve kıyaslanmıştır. Sonuç olarak ölçüm hata payı minimize edilmiştir.

Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.9 de verilmiştir. Bu grafikten çatlakın 3605 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlandığını görülmektedir. Bu da çatlakın kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir.

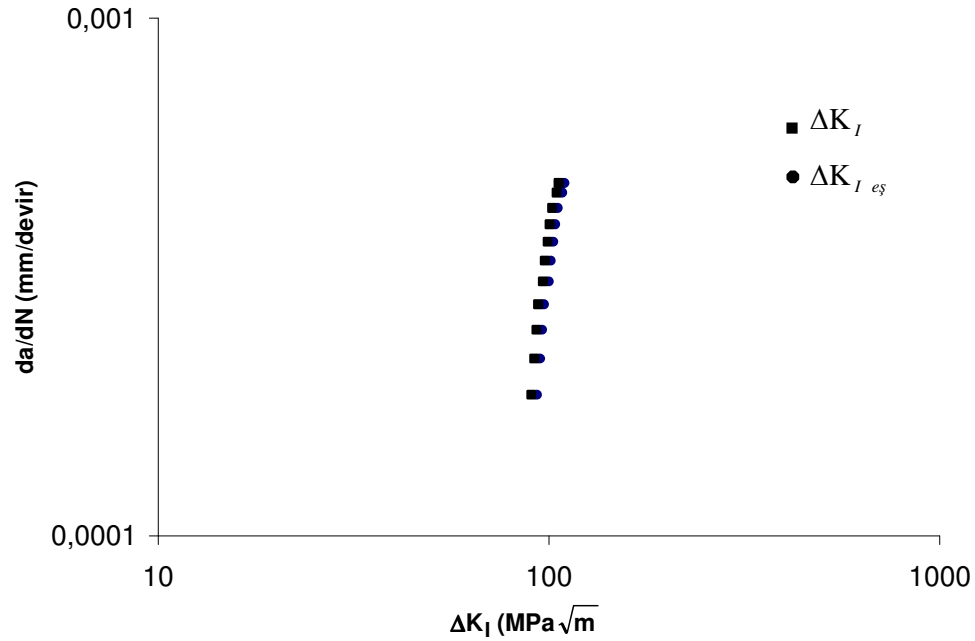
15° açılı çatlaklı numunede ortalama 5105 çevrim sayısında çatlak $\Delta a=3.9\text{mm}$ ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur. Yorulma ömrü 0° açılı çatlakla göre 174 % artmıştır. Çevrim sayısı artıkça çatlak ilerleme miktarı da artmıştır. Şekil 7.9'daki a-N grafiğinden eğri uydurma yöntemi ile elde edilen $a(N) = 1E-07x^2 + 0,0002x + 0,132$ denkleminin türevini almak kaydıyla çatlak ilerleme hızı da/dN elde edilmiştir.



Şekil 7.9 15° açılı çatlaklı kompozit malzemenin a 'nın N ile değişimi

15° açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde 15° açı yapacak şekilde kink yaparak ilerlemiştir. Bundan dolayı çatlağın bir ucundaki ilerleme düzlemi ile diğer ucu arasındaki düzlemler farklı olduğundan açılma modu (mod I) ve kayma modu (mod II) birlikte bileşik mod meydana gelmiştir. Dolayısıyla çatlak ucunda gerilme şiddet faktörü değişimleri ΔK_I ve ΔK_{II} oluşmaktadır. Eşitlik 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 ve 5.13 kullanılarak ΔK_I , $\Delta K_{I\ e\varphi}$, ΔK_{II} , $\Delta K_{II\ e\varphi}$ ve $\Delta K_{e\varphi}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler EK I b de verilmiştir.

Şekil 7.10 da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_I ve kink açısının etkisi dikkate alınarak hesaplanan $\Delta K_{I\ e\varphi}$ göre değişiminin grafiği logaritmik eksenle gösterilmiştir.

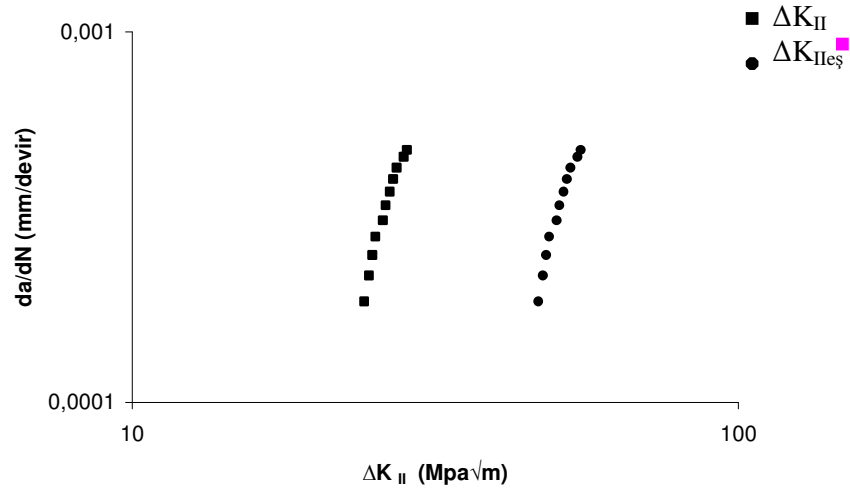


Şekil 7.10 15° çatlaklı kompozit malzemenin da/dN'nın ΔK_I ve $\Delta K_{I\ e\varphi}$ ile değişimi

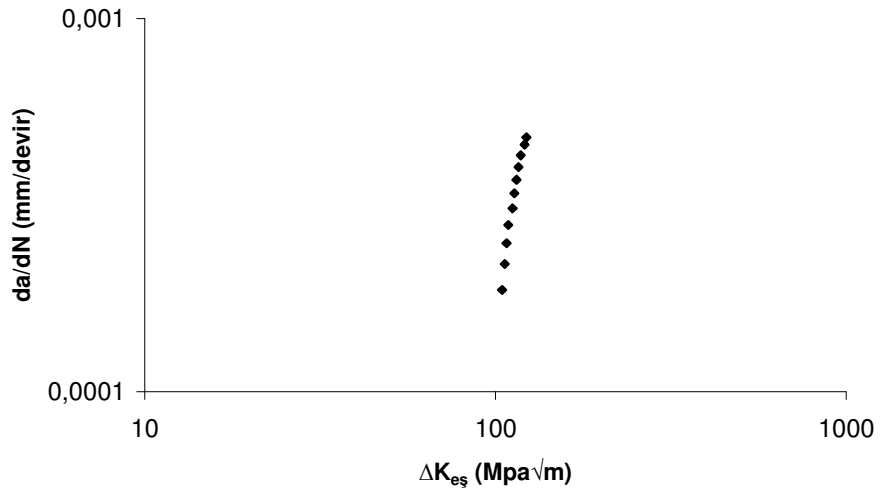
Burada ΔK_I değerleri eşitlik 5.9 dan hesaplanmıştır. Başlangıç çatlak $a_0=5.1\text{mm}$ ve $N=1895$ çevrimde $\Delta K_I=89.35 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\text{ eş}}=95.44\text{MPa}\sqrt{m}$ iken, kararsız çatlak büyümesi başladığı anda $N=7010$ ve $\Delta a=3,9\text{mm}$ de $\Delta K_I=118.09 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\text{ eş}}=122.19 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani $\Delta K_{I\text{ eş}}$, ΔK_I den daha büyük çıkmıştır. Çünkü $\Delta K_{I\text{ eş}}$ kink açısına bağlı olarak düzeltilmiş bir değerdir, daha büyük çıkması beklenen bir durumdur. Burada gerek ΔK_I ve gerekse $\Delta K_{I\text{ eş}}$ 'in artmasıyla çatlak ilerleme hızı da artmıştır.

Şekil 7.11 da ise da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_{II} ve kink açısının etkisi dikkate alınarak hesaplanan $\Delta K_{II\text{ eş}}$ göre değişimi gösterilmiştir. Başlangıç çatlak $a_0=5.1\text{mm}$ ve $N=1895$ çevrim de $\Delta K_{II}=23.84 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\text{ eş}}=46.33\text{MPa}\sqrt{m}$ iken, kırılma anında $N=7010$ ve $\Delta a=3,9\text{mm}$ de $\Delta K_{II}=31.64\text{MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\text{ eş}}=61.24 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani $\Delta K_{II\text{ eş}}$, ΔK_{II} den daha büyük çıkmıştır. Bu da $\Delta K_{I\text{ eş}}$ de olduğu gibi, $\Delta K_{II\text{ eş}}$ in de kink açısına bağlı olarak düzeltilmiş bir değer olmasındandır. Ayrıca $\Delta K_{II\text{ eş}}$ ile ΔK_{II} arasındaki büyüklük oranı, $\Delta K_{I\text{ eş}}$ in, ΔK_I e oranından daha fazladır ve bu oran kink açısının büyümesiyle oransal biçimde değişmektedir. Yine bu da beklenen bir durumdur.

Şekil 7.11 incelendiğinde gerek ΔK_{II} ve gerekse $\Delta K_{II\text{ eş}}$ değerlerinin yorulma deneyinin başlangıcından kararsız çatlak büyümesin başlamasına kadar artış gösterdiği görülmektedir. Ancak eğrinin eğimi çevrim sayısı arttıkça azalmaktadır. Eğrinin eğimin azalmasının sebebi çatlak önündeki gerilme yoğunluğu bölgesinin büyüme hızının yavaşlaması yani matrisin bu bölge içerisinde plastik olarak şekil değiştirmesidir.



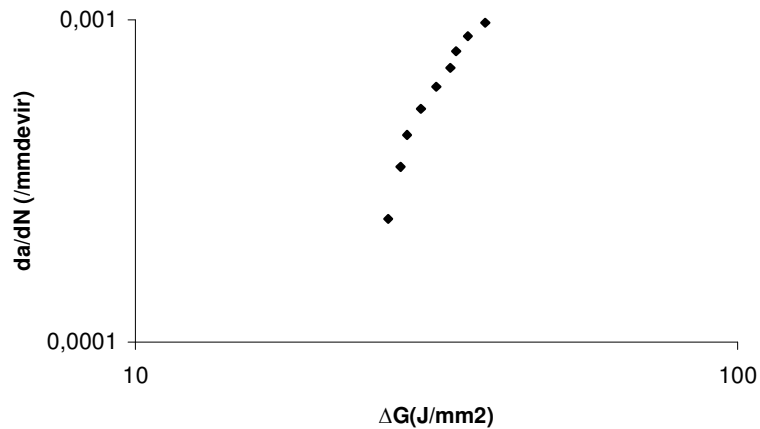
Şekil 7.11 15° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nın ΔK_{II} ve $\Delta K_{IIeş}$ 'e göre değişimi



Şekil 7.12 15° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nın $\Delta K_{eş}$ ile değişimi

Bileşik mod da $\Delta K_{eş}$ değişimi eşitlik 5.12 den hesaplandığında çatlak ilerleme miktarı $a_0=5.1$ mm iken $\Delta K_{eş}=103.40 \text{ MPa}\sqrt{m}$ değerinden, çatlak ilerleme miktarı $\Delta a=3.9$ mm ulaştığında $\Delta K_{eş}=136.68 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.12 de 15° açılı çatlaklı numunenin da/dN çatlak ilerleme hızının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarları $\Delta K_{eş}$ e göre değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği gibi $\Delta K_{eş}$ arttıkça çevrim sayısı arttıkça ve çatlak ilerledikçe artış göstermiştir. $\Delta K_{eş}$ değerleri 0° açılı çatlaklı numuneye göre 13% azalmıştır. Eğrinin eğiminin azalmasının sebebi ise çatlak ucundaki gerilme bölgesinin büyüklüğünün artması ve dolayısı ile matrisin plastik olarak şekil değişimi sebep olmuştur.

Malzemelerde çatlaklı yorulma olayında çatlak açılma miktarı ve çatlak ilerleme hızının gerilme şiddet faktörü ΔK ile ilgili olduğu kadar, şekil değiştirme enerji boşalma miktarı ΔG ile de ilgilidir. Çünkü G , çatlağın oluşabilmesi için harcanan elastik enerji boşalma miktarını ifade eder. Özellikle bileşik mod çatlak ilerlemesinde, elasto-plastik kırılma mekaniği şartlarında G daha etkilidir.

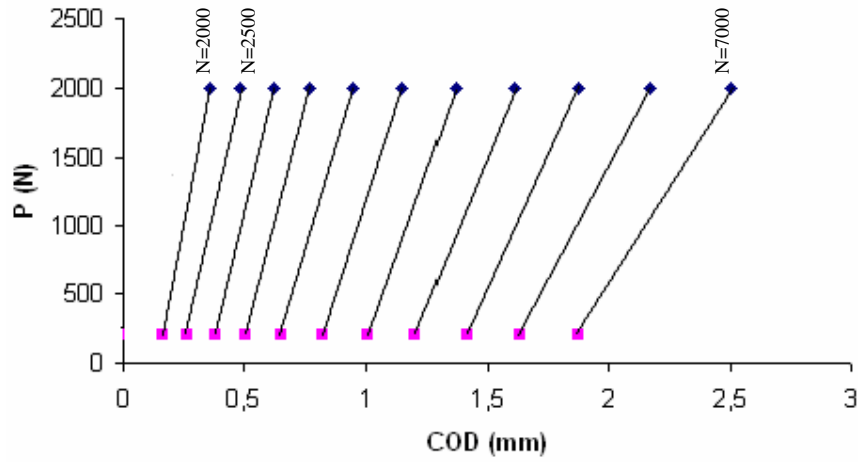


Şekil 7.13 15° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nın ΔG ile değişimi

Eşitlik 5.22 den hesaplanarak elde edilen ΔG değerleri EK I b de verilmiştir. Yatayla 15° açılı yapan çatlaklı numunede başlangıçta $a_0=5.1\text{mm}$ ve $N=1895$ çevrim de ΔG değerleri 26.3 J/mm^2 iken, kırılma anında $N=5100$ ve $\Delta a=3,9 \text{ mm}$ de 45.95 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.13 de 15° açılı çatlaklı numunede çatlak ilerleme hızı da/dN nin ΔG ile değişimi gösterilmiştir. Burada ΔG nin yorulma deneyi boyunca çevrim sayısı ve çatlak ilerleme miktarı arttıkça artmıştır. ΔG değerleri 0° açılı çatlaklı numuneye göre 10% artmıştır. Eğrinin eğiminin azalmasında en büyük etken çatlakın fiber ile karşılaşması sonucu fiber aşmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyması ve sonucunda çatlak ilerleme hızının düşmesi neden olmuştur.

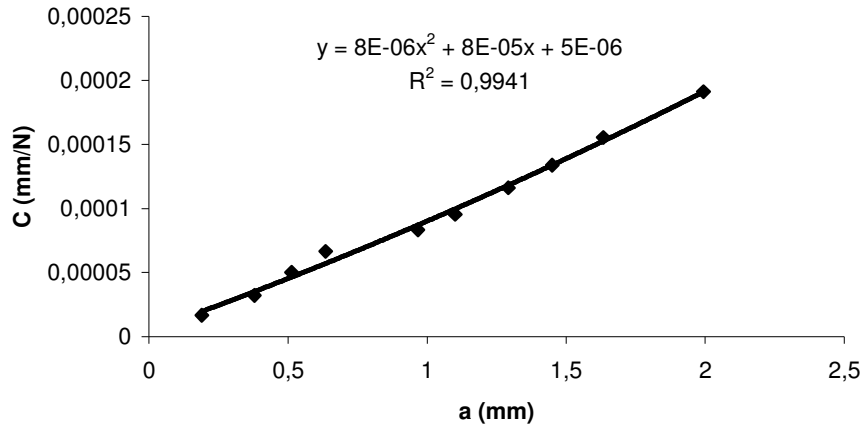
7.6 15° Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG 'nin İncelenmesi

Ortasında yatayla 15° açılı yapan kalınlık yönünde boydan boya açılmış çatlak bulunan numunelere kompliyans yöntemi uygulanmıştır. Yatayla 0° açılı yapan çatlaklı numunelerde olduğu gibi sabit gerilme oranında ($R=0.1$) yorulma deneyi uygulanmıştır. Her 500 çevrimde yorulma yükleri $P_{\max}=2000 \text{ N}$ ve $P_{\min}=200 \text{ N}$ karşılık gelen COD miktarları ve çatlak ilerleme miktarı ölçülmüştür. Şekil 7.14 te görüldüğü gibi P-COD grafiği çizilmiştir. Bu grafikte x eksenini ile 15° açılı yapan çatlaklı numune için COD değerlerinin yorulma yükleri $P_{\max}$ ve $P_{\min}$ 'e göre değişimi gösterilmiştir. Ön yorulma çatlak oluştuğunda yani $N=1895$ çevrimde $P_{\max}=2000 \text{ N}$ iken, $COD=0.35$ ve $P_{\min}=200 \text{ N}$ da, $COD=0.15 \text{ mm}$ olarak ölçülmüştür. Yorulma çevrim sayısı arttıkça çatlak ağzı açılma miktarı da artmıştır. Öyle ki kararsız çatlak uzaması başladığında yani $N=7010$ çevrimde $P_{\max}=2000 \text{ N}$ iken, $COD=2.501 \text{ mm}$ ve $P_{\min}=200 \text{ N}$ da $COD=1.871$ olmuştur. COD değerleri 0° ye göre azalmıştır. Yatayla 0° açılı yapan çatlaklı numunede yorulma yükü çatlak düzlemine dik geldiği için çatlak ağzının açılmasında daha etkili olmuştur. Yatayla 15° açılı yapan çatlaklı numunede yorulma yükü çatlakla 15° eğik geldiği için yükün bir kısmı kayma moduna sebep olmuştur. Dolayısı ile çatlak ağzı açılma miktarı azalmıştır.



Şekil 7.14 15° çatlaklı numunenin P'nin COD ile değişimi

P_{max} ve P_{min} yorulma yükü değerleri ile sabit çevrim aralıklarında ölçülen COD değerleri şekil 7.14 te görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Aynı çevrim sayısında P_{max} ve P_{min} 'e karşılık gelen COD değerleri bir eğri ile birleştirilmiştir. Elde edilen her bir eğrinin eğiminin tersinden eşitlik (5.18) yardımı ile kompiyans değerleri hesaplanmıştır. Yine 0° olduğu gibi hesaplanan C değerlerinden, aynı çevrim sayısında ölçülen çatlak ilerleme miktarı değerleri kullanılarak şekil 7.15 te görülen kompiyans ve çatlak ilerleme miktarı (C-a) grafiği çizilmiştir. Bu grafiğe, Excel programı kullanılarak eğri uydurulmuş ve $C(a) = 8E-06x^2 + 8E-05x + 5E-06$ denklemi elde edilmiştir. Grafikten elde edilen denklemin türevi alınarak dC/da değerleri bulunmuş ve eşitlik (5.19) da yerine yazılarak ΔG değerleri hesaplanmıştır.

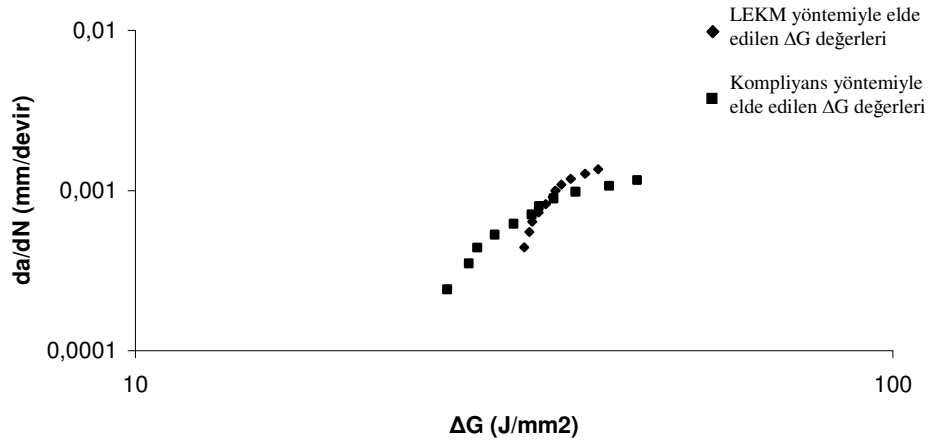


Şekil 7.15 15° çatlaklı numunelerde C'nin a ile grafiği

Şekil 7.16 da 15° açı yapan çatlaklı numune için kompliyans yöntemiyle ve LEKM kullanılarak elde edilmiş $da/dN-\Delta G$ grafikleri görülmektedir. Kompliyans yöntemi ile eşitlik (5.19) dan hesaplanan ΔG değerleri ön yorulma çatlağının oluştuğu $N=1895$ çevrimde $\Delta G = 32.6 \text{ J/mm}^2$ iken stabil olmayan çatlak büyümesin başladığı $N=7010$ çevrimde ise $\Delta G=40.8 \text{ J/mm}^2$ olarak bulunmuştur. Grafikten görüldüğü gibi ΔG değerleri başlangıçtan kırılma anına kadar artmıştır. Ayrıca ΔG değerleri 0° açılı çatlaklı numuneye göre 35 % artmıştır. Artan ΔG değerleri göstermiştir ki yorulma çatlağı ilerleyebilmek için çevrim sayısı arttıkça daha çok enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Çünkü kompozit malzemede matris içerisindeki fiberler çatlağın önünü kesmiş ve çatlak fiberi aşmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç duymuştur.

LEKM kullanılarak elde edilen ΔG değerleri eşitlik (5.22) kullanılarak hesaplanmıştır. Yine LEKM kullanılarak oluşturulmuş ve şekil 7.16 da verilen 15° çatlaklı numune için $da/dN-\Delta G$ grafiği incelenecek olursa, başlangıçta $\Delta G=26.03 \text{ J/mm}^2$ iken kırılma anında ise $\Delta G=45.95 \text{ J/mm}^2$ olarak bulunmuştur.

İki farklı yöntem ile bulunan ΔG değerleri arasında başlangıçta 19.3 % farklılık varken kırılmadan hemen önce bu fark 11.2 % olarak hesaplanmıştır. İki yöntem arasındaki uyumsuzluk matrisin bölgesel olarak plastik şekil değişiminden kaynaklanmaktadır.



Şekil 7.16 15° çatlaklı numunelerde da/dN'nın ΔG ile değişimi

7.7 15° Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

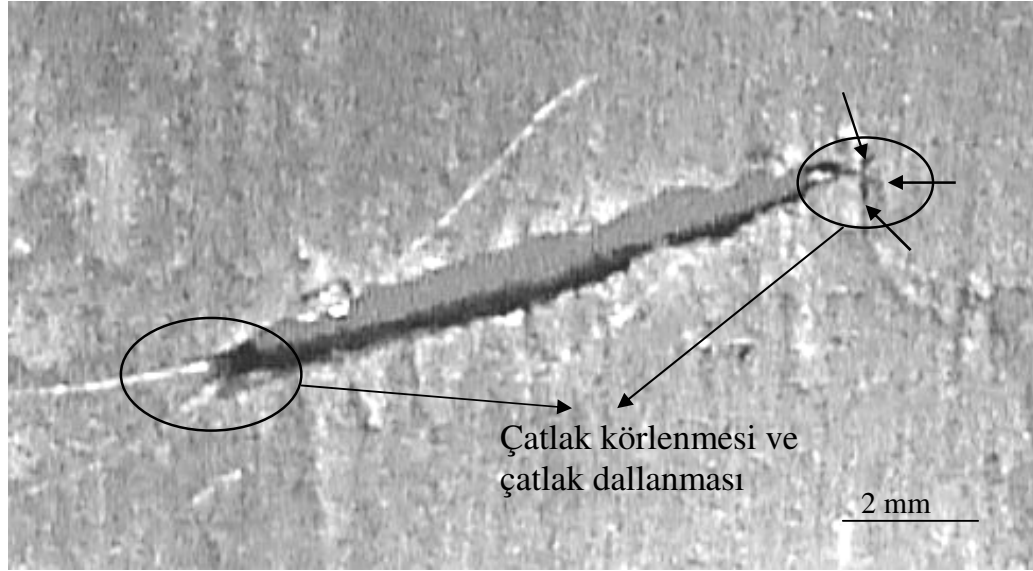
Burada üzerinde x eksenini ile 15° açı yapan çatlaklı numunede açılma ve kayma modlarında (mod I ve mod II) yani bileşik mod hasarı oluşmuştur. Hasar mekanizması incelenecek olursa, 15° açılı çatlaklı numuneye ilk olarak 0.1 mm boyunda ön yorulma çatlakları açılmıştır. Ön yorulma çatlakları oluşana kadar çatlak ağzı miktarı ilk çevrimden itibaren $\Delta COD=0.044$ mm açılmıştır.

Yorulma deneyinde artan çevrim sayısı ile birlikte çatlak uçlarında matrisin beyazlaştığı yani plastik olarak şekil değiştirdiği gerilme bölgeleri oluşmuştur. Bu bölgede matrisin plastik olarak şekil değiştirmesinin sebebi artan gerilme yoğunluğu nedeniyle matrisin elastik bölgeden çıkarak plastik bölgeye girmesidir. Matrisin plastik olarak şekil değiştirdiği bu bölgeden çatlak matris içerisinde fiber ile karşılaşana kadar kararlı bir şekilde ilerlemiştir. Bu esnada çatlak ağzında açılma devam etmiştir. Yorulma çevrim sayısı arttıkça matris içerisindeki çatlak yatayla 15° yapacak şekilde ilerlemeye devam etmiştir. Bu olaya “kink” denir. (**Kink:** çatlak ilerlemesinin çatlak düzlemi doğrultusunda gelişmeyip, herhangi bir yönde belirli bir açı yapacak şekilde yönlendirilerek ilerlemesi olayıdır.)

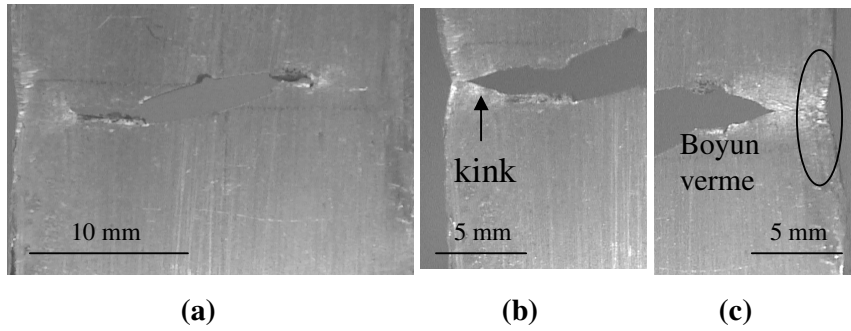
Çatlak fibere ulaştığında çatlakın ilerleme hızı azalmış ancak çatlak ağzı açılmaya devam etmiştir. Çatlak fiber kesmeden aşana kadar çatlakın önündeki

matriste gerilme yoğunlaşması artmış ve plastik bölge artan çevrim sayısı ile büyümüştür. Çatlak uçlarında ise matrisin plastik şekil değişimine bağlı olarak şekil 7.17. da görüldüğü gibi çatlak körlenmesi ve çatlak dallanması meydana gelmiştir. Çatlak körlenmesi olayı düşük akma dayanımına sahip yüksek şekil değiştirebilme kabiliyetine sahip malzemelerde görülen bir durumdur. Çünkü matrisin plastik olarak şekil değişimi çatlak ucunu tahrip eder ve çatlak ucunun körlenmesine sebep olur. Çatlak körlenmesi matrisin şekil değiştirdiği bölgenin sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Çatlak uçlarında çatlak düzlemi ile yaklaşık $\pm 45^\circ$ küçük dallanmış çatlaklar görülmüştür. Bu küçük çatlaklar yorulma esnasında yük maksimuma ulaşana kadar açılma ve ilerleme eğilimi gösterdiler. Yorulma olayında yük azalmaya başlayıp minimuma giderken ise yön değiştirerek çatlak ilerleme düzlemi boyunca kapandılar. Bu olay her çevrimde devam etmiştir.

Çatlak çevrim sayısının artma ile birlikte önündeki fiberi kesmeden aşmıştır. Bu durumda fiber-matris ayrılması gerçekleşmiş ve fiber köprülenmesi ortaya çıkmıştır. Çatlak ilerlemesi, çatlak körlenmesi ile oluşan küçük dallanmış çatlaklardan devam etmiştir. Çatlak ilerleme düzlemi doğrultusunda malzeme genişlik yönünde azalma yani boyun verme gözlenmiştir. Çatlak boyu $a=8.9$ mm ilerlediğinde kararsız bölgeye girmiştir. Fiberler birkaç saniye aralığında ardı ardına kopmuş ve numune kırılmıştır. Çatlağın kararsız bölgeye girmesinden hemen önce çatlak ilerleme doğrultusunda oluşan boyun verme miktarında artış görülmüştür. Kırılma yüzeyi incelendiğinde bazı fiberlerin fiber-matris ayrılması sonucu matristen sıyrıldığı görülmüştür.



Şekil 7.17 15° çatlaklı kompozit malzemede çatlak körlenmesi ve dallanması



Şekil 7.18 15° çatlak geometrisine sahip numunenin kırılma sonrası resimleri

- a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi
- b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında matris yırtılması
- c-) Çatlağın ilerlediği bölgeler

Sonuç olarak yatayla 15° açılı yapan çatlaklı numunenin kırılma mekanizması yatayla 0° açılı yapan çatlaklı numuneye benzerdir. Ancak yatayla 0° açılı yapan çatlaklı numunede çatlak körelmesi bu kadar belirgin ortaya çıkmamıştır. Kırılma mekanizması, tek yönlü fiber takviyeli metal kompozitlerde çekme yükü etkisi altında çatlak önünde matriste çekme gerilmesi yoğunluğu oluşur. Bu çekme gerilmeleri matris tarafından fiberlere çekme ve kayma gerilmeleri olarak aktarılır. Fiberlerde çekme gerilmeleri oluşurken fiber-matris arayüzeyinde kayma gerilmeleri oluşur. Yatayla 15° açılı yapan çatlaklı numunede de bu olay gerçekleşmiş, çatlak önündeki matris artan gerilme yoğunluğu sebebiyle plastik bölgeye geçmiştir. Plastik bölgeye giren matris bu bölgede kalınlık yönünde şekil değiştirmiştir. Çevrim sayısı ile artan gerilme yoğunluğu arayüzey dayanımına ulaştığında ise fiber-matris ayrılması gerçekleşmiş ve kırılan numunelerde sıyrılmış fiberler ortaya çıkmıştır. Şekil 7.18 (b) ve (c) de görüldüğü gibi numunenin boyun vermesinin sebebi ise numunenin deney esnasında uzamasıdır.

7.8 30° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi

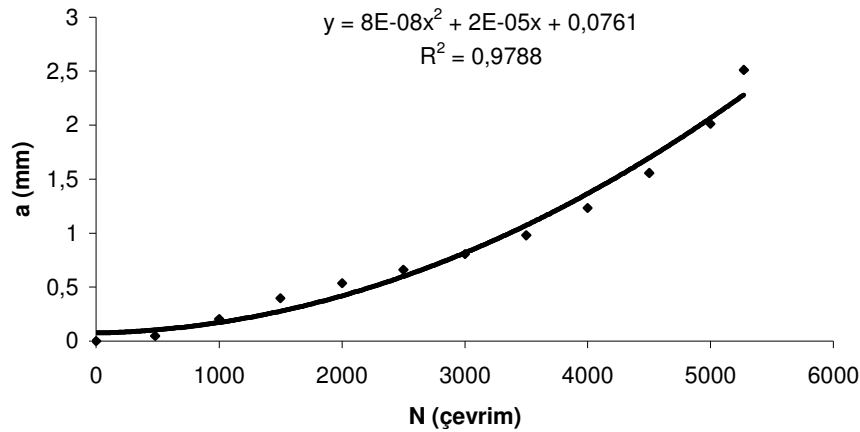
Ortasında yatayla 30° lik açılı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneler 15° de ki numuneler de olduğu gibi $R = 0.1$ gerilme oranında ve $f = 0.65$ frekansta yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Numune de yorulma ön çatlaklı açılmış ve 480 yorulma çevrim sayısında ve 0.1 mm olarak ölçülmüştür. Ön yorulma çatlaklarının açılmasının ardından yorulma deneyine geçilerek gerekli değerler ölçülmeye başlanmıştır.

Yatayla 0° ve 15° lik açılı yapan numunelerdeki gibi aynı şartlarda yorulma deneyleri gerçekleştirilmiş ve aynı ölme değerlendirme yöntemleri uygulanmıştır. Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği Şekil 7.19 de verilmiştir. Bu grafikten çatlak 4500 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. Bu da çatlak ın kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir.

Yatayla 30° açı yapacak şekilde çatlak bulunan numunelerde ortalama 5270 çevrim sayısında çatlak $\Delta a=2.51\text{mm}$ ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur. Yorulma çevrim sayısı 30° açılı çatlaklı numunede 0° açılı çatlaklı numuneye göre 106 % artmış, 15° açılı çatlaklı numuneye göre 32 % azalmıştır.

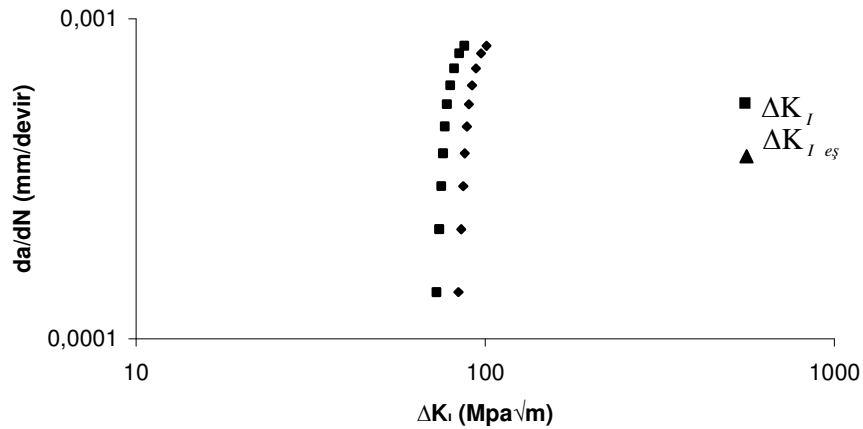
15° çatlaklı numunelerde olduğu gibi 30° açılı çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde 30° açı yapacak şekilde kink yaparak ilerlemiştir. Yine 5. Bölümde ilgili denklemler kullanılarak ΔK_I , $\Delta K_{I\text{ eş}}$, ΔK_{II} , $\Delta K_{II\text{ eş}}$ ve $\Delta K_{\text{eş}}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler EK I c de verilmiştir.

Şekil 7.19 daki a-N grafiğinden Excel programı yardımı ile eğri uydurma yöntemi kullanılarak bulunan $a(N) = 8E-08x^2 + 2E-05x + 0,0761$ denkleminin türevi alınmıştır. Böylece yatayla 30° açı yapan çatlaklı numuneye ait yorulma çatlak ilerlemesi hızı da/dN değerleri elde edilmiştir.



Şekil 7.19 30° açılı çatlaklı kompozit malzemede a'nın N'ye göre değişimi

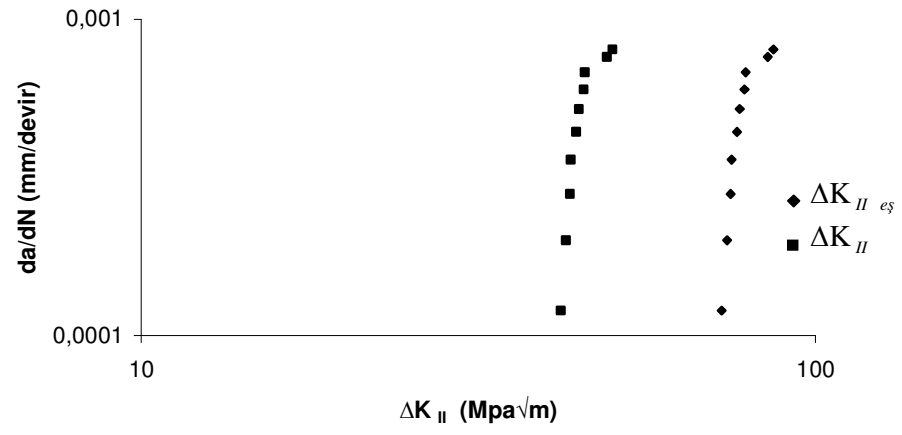
Şekil 7.20 te 30° açılı çatlaklı numunelerde da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_I ve $\Delta K_{I\ e\ \text{ş}}$ göre değişiminin grafiği logaritmik eksenle gösterilmiştir. Başlangıç çatlaklığı $a_0=5.04$ mm ve $N=480$ çevrimde $\Delta K_I=71.49$ MPa $\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ e\ \text{ş}}=82.55$ MPa $\sqrt{m}$ iken, kararsız çatlak ilerlemesinin başladığı $N=5270$ ve $\Delta a=2.51$ mm anında $\Delta K_I=87.22$ MPa $\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ e\ \text{ş}}=100.71$ MPa $\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Kink açısına bağlı olarak $\Delta K_{I\ e\ \text{ş}}$, ΔK_I e göre büyük çıkmış ve 15° çatlaklı numune ye ait ΔK_I ve $\Delta K_{I\ e\ \text{ş}}$ 'e göre değerler azalma göstermiştir. Bu da açının artmasıyla açılma modunun etkisinin azaldığını göstermektedir ve beklenen bir durumdur. Şekil 7.20 de görüldüğü gibi ΔK_I ve $\Delta K_{I\ e\ \text{ş}}$ çevrim sayısı arttıkça ve çatlak ilerledikçe artış göstermiştir.



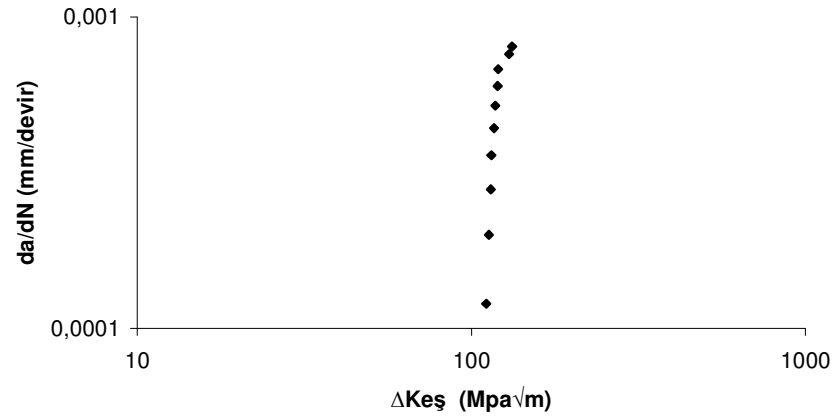
Şekil 7.20 30° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nin ΔK_I ve $\Delta K_{I\ e\ \text{ş}}$ ile değişimi

Şekil 7.21 de ise 30° açılı çatlaklı numunelerde da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_{II} ve $\Delta K_{II\ e\ \vartheta}$ göre değişimi gösterilmiştir. Başlangıç çatlağı $a_0=5.04$ mm ve $N=480$ çevrimde $\Delta K_{II}=41.27$ $MPa\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ e\ \vartheta}=71.49$ $MPa\sqrt{m}$ iken, stabil olmayan çatlak ilerlemesinin başladığı $N=5270$ ve $\Delta a=2.51$ mm anında $\Delta K_{II}=50.35$ $MPa\sqrt{m}$, $\Delta K_{II\ e\ \vartheta}=87.21$ $MPa\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur.

Yine kink açısının değişmesiyle $\Delta K_{II\ e\ \vartheta}$, ΔK_{II} den daha büyük çıkmış ve 15° çatlaklı numuneye ait $\Delta K_{II\ e\ \vartheta}$ ve ΔK_{II} 'e göre değerler artış göstermiştir. Bu da kayma modunun etkisinin arttığını gösteren ve beklenen bir durumdur. Şekil 7.21 incelendiğinde gerek ΔK_{II} ve gerekse $\Delta K_{II\ e\ \vartheta}$ değerlerinin yorulma deneyinin başlangıcından stabil olmayan çatlak ilerlemesi başlangıcına kadar arttığı görülmektedir. Ancak eğrinin eğimi giderek azalmaktadır. Eğrinin eğiminin azalmasının sebebi çatlak ilerleme hızının azalmasıdır. Çatlak ilerleme hızı ise çatlak ucunun körelmesi ve açılma modunun etkisinin çatlağın yatayla yaptığı açı arttıkça azalmasından kaynaklanmaktadır.



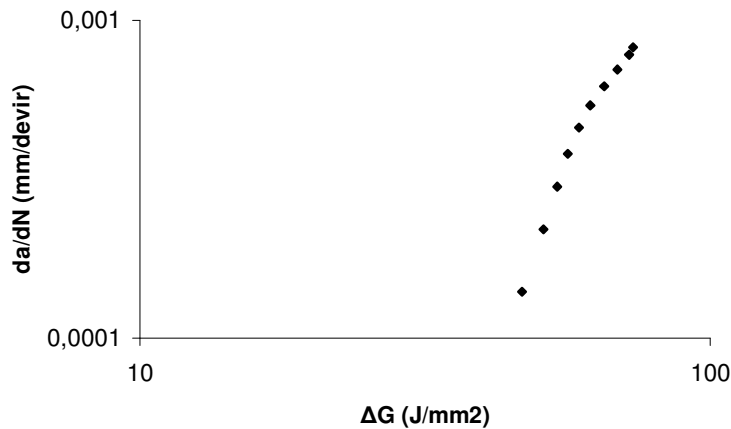
Şekil 7.21 30° çatlaklı kompozit malzemedde da/dN 'nın ΔK_{II} ve ΔK_{II} eş ile değişimi



Şekil 7.22 30° çatlaklı kompozit malzemedde da/dN 'nın $\Delta K_{eş}$ ile değişimi

Yatayla 30° açılı yapan çatlaklı numunelerde bileşik mod da $\Delta K_{eş}$ değişimi Başlangıç çatlaklığı $a_0=5.04$ mm ve $N=480$ çevrimde $\Delta K_{eş}=109.21 \text{ MPa}\sqrt{m}$ iken, stabil olmayan çatlak ilerlemesinin başladığı $N=5270$ ve $\Delta a=2.51$ mm anında $\Delta K_{eş}=133.22 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.22 de 30° açılı çatlaklı numunenin da/dN çatlak ilerleme hızının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarları $\Delta K_{eş}$ e göre değişimi gösterilmiştir. Beklenildiği gibi $\Delta K_{eş}$ çatlak ilerleme miktarı ve çevrim sayısı arttıkça artmıştır. 30° açılı çatlaklı numunede $\Delta K_{eş}$ değerleri 0° açılı çatlaklı numuneye göre 26.6 %, 15° açılı çatlaklı numuneye göre 14.7 % azalmıştır. Şekil 7.22 deki eğrinin eğiminin azalmasının sebebi çatlak ilerleme hızının azalmasıdır. Çatlak ilerleme hızı ise çatlak önündeki plastik bölgenin artması ve buna bağlı olarak çatlak körelmesinin oraya çıkması nedeniyle azalmıştır.

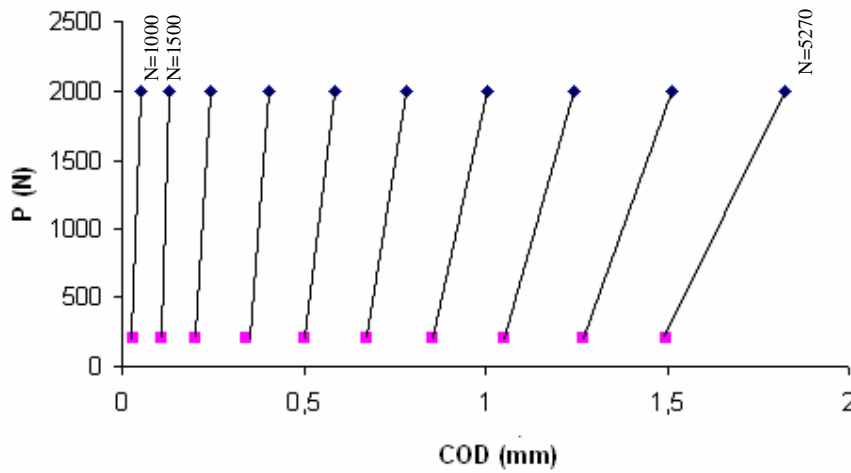
Yatayla 30° açılı yapan çatlaklı numuneler için elde edilen ΔG değerleri EK I c de verilmiştir. Başlangıç çatlaklığı $a_0=5.04$ mm ve $N=480$ çevrimde ΔG değeri 46.76 J/mm^2 iken, , stabil olmayan çatlak ilerlemesinin başladığı $N=5270$ ve $\Delta a=2.51$ mm anında 73.23 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.23 da 30° açılı çatlaklı numunede çatlak ilerleme hızı da/dN nin ΔG ile değişimi gösterilmiştir. Yatayla 30° açılı yapan çatlaklı numunede ΔG değerleri 0° açılı numuneye göre 2.9 % artmış, 15° açılı çatlaklı numuneye göre 6.8 % azalmıştır.



Şekil 7.23 30° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nin ΔG ile değişimi

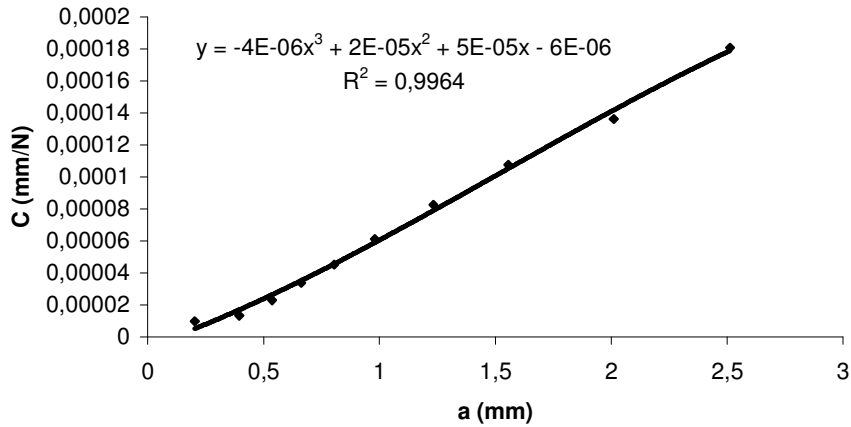
7.9 30° Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG 'nin İncelenmesi

Ortasında yatayla 30° açı yapan kalınlık yönünde boydan boya açılmış çatlak bulunan numunelere kompliyans yöntemi uygulanmıştır. Yatayla 0° açı yapan çatlaklı numunelerde olduğu gibi sabit gerilme oranında ($R=0.1$) yorulma deneyi uygulanmıştır. Her 500 çevrimde yorulma yükleri $P_{\max} = 2000$ N ve $P_{\min} = 200$ N karşılık gelen COD miktarları ve çatlak ilerleme miktarı ölçülmüştür. Şekil 7.24 te görüldüğü gibi P-COD grafiği çizilmiştir. Bu grafikte x eksenini ile 30° açı yapan çatlaklı numune için COD değerlerinin yorulma yükleri $P_{\max}$ ve $P_{\min}$ 'e göre değişimi gösterilmiştir. Ön yorulma çatlak oluştuğunda yani $N=480$ çevrimde $P_{\max}=2000$ N iken, $COD=0.050$ ve $P_{\min}=200$ N da, $COD=0.032$ mm olarak ölçülmüştür. Yorulma çevrim sayısı arttıkça çatlak ağzı açılma miktarı da artmıştır. Öyle ki stabil olmayan çatlak uzaması başladığında yani $N=5270$ çevrimde $P_{\max}=2000$ N iken, $COD= 1.82$ mm ve $P_{\min}=200$ N da $COD=1.498$ mm olmuştur. COD değerleri 15° ye göre azalmıştır. Yatayla 15° açı yapan çatlaklı numunede yorulma yükü çatlak düzlemine 30° göre daha dik geldiği için çatlak ağzının açılmasında daha etkili olmuştur. Yatayla 30° açı yapan çatlaklı numunede yorulma yükü çatlakla 30° eğik geldiği için yükün bir kısmı kayma moduna sebep olmuştur. Dolayısı ile yatayla 15° açı yapan numunelere göre çatlak ağzı açılma miktarı azalmıştır.

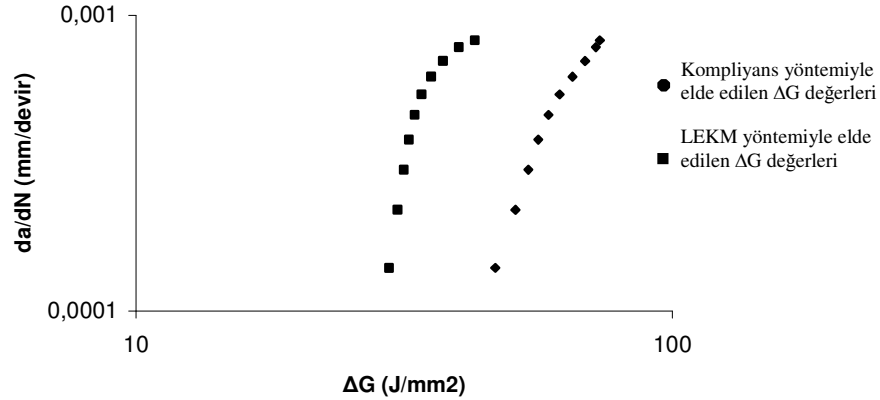


Şekil 7.24 30° çatlaklı numunenin P'nin COD ile değişimi

Sabit çevrim aralıklarında ölçülen $P_{\max}$ ve $P_{\min}$ yorulma yükü değerlerine karşılık gelen COD değerleri şekil 7.24 te görüldüğü gibi grafik haline getirilmiştir. Aynı çevrim sayısında $P_{\max}$ ve $P_{\min}$ yorulma yükü değerlerine karşılık gelen COD değerleri bir eğri ile birleştirilmiştir. Elde edilen her eğrinin eğiminin tersi eşitlik (5.18) e göre hesaplanarak yatayla 30° açı yapan çatlaklı numunelere ait kompiyans değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan C değerleri ve aynı çevrim sayısında ölçülen çatlak ilerleme miktarı değerleri kullanılarak şekil 7.25 te görülen kompiyans-çatlak ilerleme miktarı grafiği oluşturulmuştur. Bu grafiğe Excel programı kullanılarak eğri uydurulmuştur. Elde edilen $C(a) = -4E-06x^3 + 2E-05x^2 + 5E-05x - 6E-06$ denkleminin türevi alınarak dC/da değerleri hesaplanmıştır. Bulunan dC/da değerleri denklem (5.19) da yerine konularak ΔG değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 7.25 30° çatlaklı numunelerde C'nin a ile grafiği



Şekil 7.26 30° çatlaklı numunelerde da/dN 'nın ΔG ile değişimi

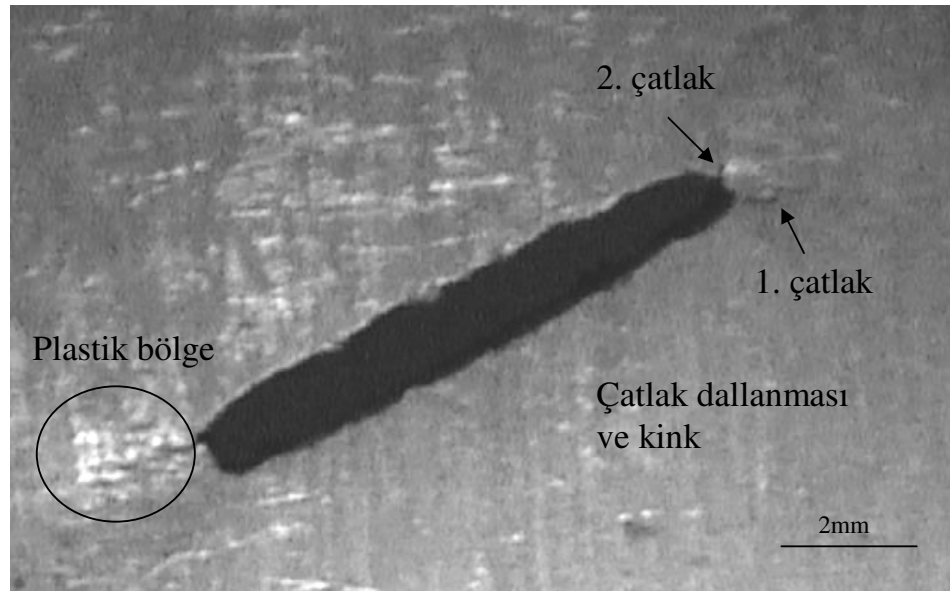
Şekil 7.26 da x eksenini ile 30° açı yapan çatlaklı numune için kompiyans yöntemiyle ve LEKM kullanılarak elde edilmiş da/dN - ΔG grafikleri görülmektedir. Kompiyans yöntemi ile eşitlik (5.19) kullanılarak hesaplanan ΔG değerleri yorulma deneyi başlangıcı olan $N=480$ çevrim ve $a_0=5.04$ çatlak ilerleme değerinde $\Delta G = 46.7 \text{ J/mm}^2$ iken stabil olmayan çatlak ilerlemesinin başladığı $N=5270$ ve $\Delta a=2.51 \text{ mm}$ anında $\Delta G=73.2 \text{ J/mm}^2$ olarak bulunmuştur. Grafikten görüldüğü gibi ΔG değerleri başlangıçtan kırılma anına kadar artmıştır. Ayrıca 30° açılı çatlaklı numunede ΔG değerleri 0° açılı çatlaklı numuneye göre 146 %, 15° açılı çatlaklı numuneye göre 82.1 % artmıştır. Artan ΔG değerleri göstermiştir ki yorulma çatlakları ilerleyebilmek için çevrim sayısı arttıkça daha çok enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Çünkü kompozit malzemede matris içerisindeki fiberler çatlakların önünü kesmiş ve çatlak fiberi aşmak için daha fazla enerjiye ihtiyaç duymuştur. Bununla birlikte çatlakların körlenmesi ve dallanması nedeniyle çatlak birkaç küçük çatlak üzerinden ilerlemeye çalıştığı için ilerlemek için ihtiyaç duyduğu enerji artmış bu durumda ΔG değerlerinin artmasına sebep olmuştur.

LEKM kullanılarak elde edilen ΔG değerleri eşitlik (5.22) kullanılarak hesaplanmıştır. Yine LEKM kullanılarak oluşturulmuş ve şekil 7.26 da verilen 30° çatlaklı numune için da/dN - ΔG grafiği incelenecek olursa, başlangıçta $\Delta G=28.79 \text{ J/mm}^2$ iken kırılma anında ise $\Delta G=42.85 \text{ J/mm}^2$ olarak bulunmuştur. İki yöntem arasındaki fark başlangıçta 38.3% iken kırılmadan hemen önce bu fark 41.4% olarak hesaplanmıştır.

7.10 30° Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

Burada üzerinde yatayla 30° açı yapan çatlaklı numunede açılma ve kayma modlarında (mod I ve mod II) yani bileşik mod hasarı oluşmuştur. Hasar mekanizması incelenecek olursa, 30° açılı çatlaklı numuneye ilk olarak 0.1 mm boyunda ön yorulma çatlaklığı açılmıştır. Ön yorulma çatlaklığı oluşana kadar çatlak ağzı miktarı ilk çevrimden itibaren $\Delta\text{COD}=0.05$ mm açılmıştır.

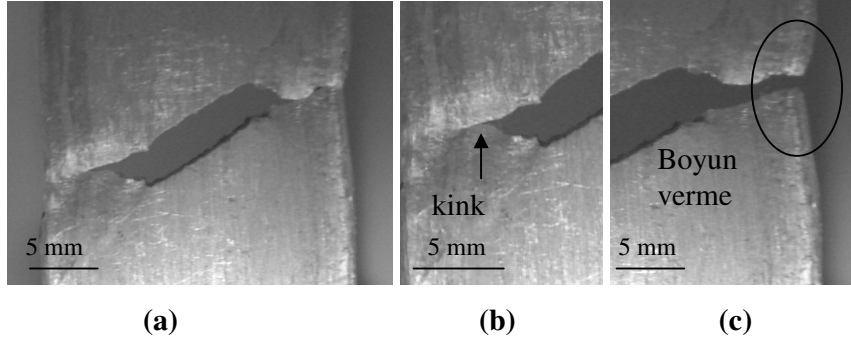
Yorulma deneyinde artan çevrim sayısı ile birlikte çatlak uçlarında matrisin beyazlaştığı yani plastik olarak şekil değiştirdiği gerilme bölgeleri oluşmuştur. Bu bölgede matrisin plastik olarak şekil değiştirmesinin sebebi artan gerilme yoğunluğu nedeniyle matrisin elastik bölgeden çıkarak plastik bölgeye girmesidir. Matrisin plastik olarak şekil değiştirdiği bu bölgeden çatlak matris içerisinde fiber ile karşılaşana kadar kararlı bir şekilde ilerlemiştir. Bu esnada çatlak ağzında açılma devam etmiştir. Yorulma çevrim sayısı arttıkça matris içerisindeki çatlak yatayla 30° yapacak şekilde ilerlemeye devam etmiştir



Şekil 7.27 30° çatlaklı kompozit malzemed e çatlak dallanması

Çatlak fibere ulaştığında çatlağın ilerleme hızı azalmış ancak çatlak ağzı açılmaya devam etmiştir. Çatlak fiber kesmeden aşana kadar çatlağın önündeki matriste gerilme yoğunlaşması artmış ve plastik bölge artan çevrim sayısı ile büyümüştür. Çatlak uçlarında ise matrisin plastik şekil değişimine bağlı olarak şekil 7.27 de görüldüğü gibi çatlak körlenmesi ve çatlak dallanması meydana gelmiştir. Çatlak körlenmesi matrisin şekil değiştirdiği bölgenin sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Çatlak uçlarında çatlak düzlemi ile yaklaşık $\pm 45^\circ$ küçük dallanmış çatlaklar görülmüştür. Bu küçük çatlaklar yorulma esnasında yük maksimuma ulaşana kadar açılma ve ilerleme eğilimi gösterdiler. Yorulma olayında yük azalmaya başlayıp minimuma giderken ise yön değiştirerek çatlak ilerleme düzlemi boyunca kapandılar. Bu olay her çevrimde devam etmiştir.

Çatlak çevrim sayısının artma ile birlikte önündeki fiberi kesmeden aşmıştır. Çatlağın fiberi aşmadan geçmesi fiber-matris arayüzey ayrılmasının ve dolayısı ile fiber köprülenmesinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu iki mekanizma da numunenin kırılmasını geciktirmiştir. Çatlak ilerlemesi, çatlak körlenmesi ile oluşan küçük dallanmış çatlaklardan devam etmiştir. Çatlak ilerleme düzlemi doğrultusunda malzeme genişlik yönünde azalama yani boyun verme gözlenmiştir. Çatlak boyu $a=7.51$ mm ilerlediğinde kararsız bölgeye girmiş ve fiberler birkaç saniye aralığında ardı ardına kopmuş ardından numune kırılmıştır. Çatlağın kararsız bölgeye girmesinden hemen önce çatlak ilerleme doğrultusunda oluşan boyun verme miktarında artış görülmüştür. Kırılma yüzeyi incelendiğinde bazı fiberlerin fiber-matris ayrılması sonucu matristen sıyrıldığı görülmüştür.



Şekil 7.20 Kırılma sonrası 30° çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

- a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi
- b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında fiber-matris ayrılması
- c-) Çatlağın ilerlediği bölgeler

Sonuç olarak yatayla 30° açı yapan çatlaklı numunenin kırılma mekanizması yatayla 15° açı yapan çatlaklı numuneye benzerdir. Kırılma mekanizması, tek yönlü fiber takviyeli metal kompozitlerde çekme yükü etkisi altında çatlak önünde matriste çekme gerilmesi yoğunluğu oluşur. Bu çekme gerilmeleri matris tarafından fiberlere çekme ve kayma gerilmeleri olarak aktarılır. Fiberlerde çekme gerilmeleri oluşurken fiber-matris arayüzeyinde kayma gerilmeleri oluşur. Yatayla 30° açı yapan çatlaklı numunede de bu olay gerçekleşmiş, çatlak önündeki matris artan gerilme yoğunluğu sebebiyle plastik bölgeye geçmiştir. Plastik bölgeye giren matris fiber üzerine sıvanmış ve bu bölgede kalınlık yönünde şekil değiştirmiştir. Çevrim sayısı ile artan gerilme yoğunluğu arayüzey dayanımına ulaştığında ise fiber-matris ayrılması gerçekleşmiş ve kırılan numunelerde sıyrılmış fiberler ortaya çıkmıştır. Fiber-matris ayrılması kompozit numunede fiber köprülenmesini ortaya çıkarmıştır. Bu kırılma mekanizmaları numunenin yorulma ömrünü arttırmıştır. Şekil 7.28 (c) de görüldüğü gibi numunenin boyun vermesinin sebebi ise numunenin deney esnasında uzamasıdır.

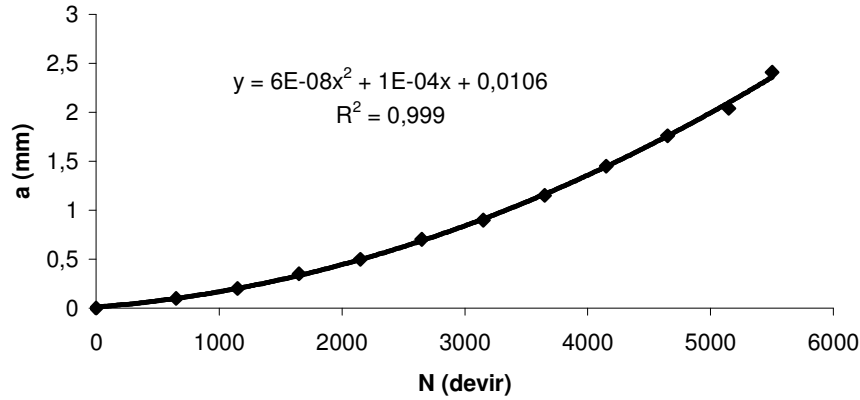
7.11 45° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi

Merkezinde x ekeseni ile 45° lik açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneler 0°, 15° ve 30° çatlaklı numuneler de olduğu gibi $R= 0.1$ gerilme oranında ve $f= 0.65$ frekans şartlarında yorulma deneyleri uygulanmıştır. Ön yorulma çatlağı 1850 yorulma çevrim sayısında ve 0.1 mm olarak ölçülmüştür. Ön yorulma çatlağının açılmasının ardından yorulma deneyine geçilerek gerekli değerler ölçülmeye başlanmıştır.

Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.29 da verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi çatlak 4650 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlanmaktadır.

Yatayla 45° açı yapacak şekilde çatlak bulunan numunelerde ortalama 5500 çevrim sayısında çatlak $\Delta a=2.51$ mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kırılmıştır. Yorulma ömrü çevrim sayısı yatayla 45° açı yapan çatlaklı numunelerde, 0° açılı çatlaklı numunelere göre 149 % artmış, 15° açılı çatlaklı numunelere göre 9.2 % azalmış, 30° açılı çatlaklı numunelere göre 20.4 % artmıştır.

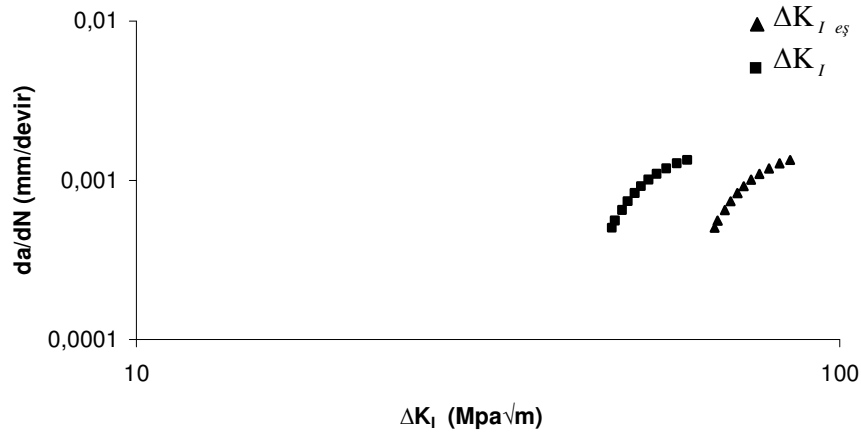
Yatayla 45° açı yapan çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde 45° açı yapacak şekilde kink yaparak ilerlemiştir. Yine5. Bölümde ilgili denklemler kullanılarak ΔK_I , $\Delta K_{I_{eş}}$, ΔK_{II} , $\Delta K_{II_{eş}}$ ve $\Delta K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler EK I d de verilmiştir.



Şekil 7.29 45° açılı çatlaklı kompozit malzemenin (a-N) grafiği

Şekil 7.29 daki a-N grafiğinden Excel programı yardımı ile eğri uydurulmuş ve $a(N) = 6E-08x^2 + 1E-04x + 0,0106$ denklemi elde edilmiştir. Bu denklemin türevi alınmıştır. Böylece yatayla 45° açı yapan çatlaklı numuneye ait yorulma çatlak ilerlemesi hızı da/dN değerleri elde edilmiştir.

Şekil 7.30 de 45° açılı çatlaklı numunelerde da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_I ve $\Delta K_{I_{eş}}$ göre değişiminin grafiği logaritmik eksenle gösterilmiştir. Yorulma deneyinin başlangıcında yani $N=1850$ ve $a_0=5.1$ mm iken $\Delta K_I=47.43 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{I_{eş}}=66.40 \text{ MPa}\sqrt{m}$, kararsız çatlak ilerlemesinin başlangıcı olan $N=7350$ ve $\Delta a=2.51$ mm anında ise $\Delta K_I=60.71 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{I_{eş}}=84.99 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olarak hesaplanmıştır. Kink açısına bağlı olarak $\Delta K_{I_{eş}}$, ΔK_I den büyük çıkmıştır. Açılma ve kayma modlarının birlikte çatlak ilerlemesine etki ettiği 15° ve 30° çatlaklı numunelere ait ΔK_I ve $\Delta K_{I_{eş}}$ 'e göre değerler azalma göstermiştir. Bu da açının artmasıyla açılma modunun etkisinin azaldığını ve kayma modunun etkisinin attığını göstermektedir ve beklenen bir durumdur.

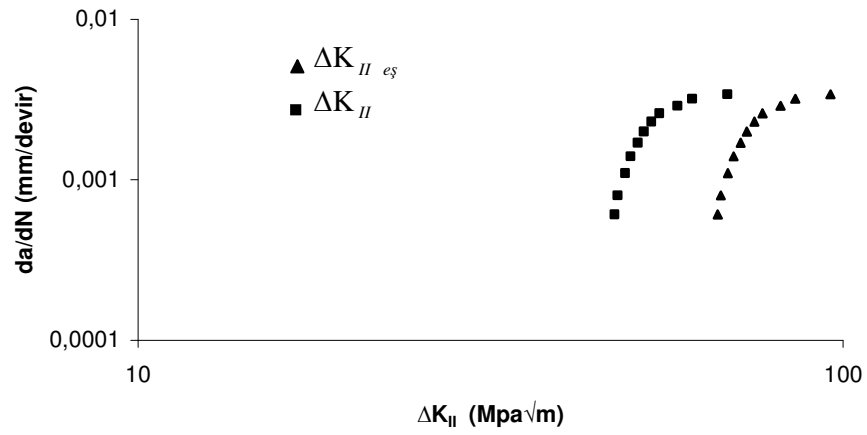


Şekil 7.30 45° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nın ΔK_I ve $\Delta K_{I eş}$ ile değişimi

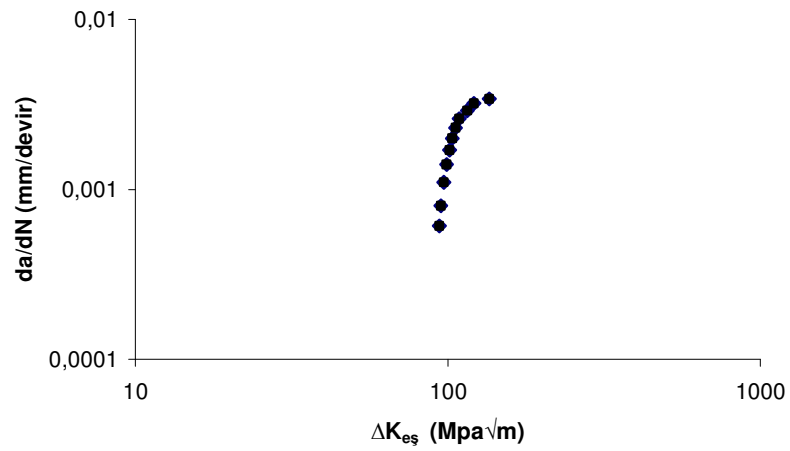
Şekil 7.31 de ise 45° açılı çatlaklı numunelerde da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_{II} ve $\Delta K_{II eş}$ göre değişiminin grafiği logaritmik ekseninde gösterilmiştir. Çatlak ilerlemesi başlangıcında $N=1850$ ve $a_0=5.1$ mm iken $\Delta K_{II}=47.43 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{II eş}=66.40 \text{ MPa}\sqrt{m}$ iken, kararsız çatlak ilerlemesinin başlangıcı olan $N=7350$ ve $\Delta a=2.51$ mm anında ise $\Delta K_{II}=60.71 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{II eş}=84.99 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. 15° ve 30° çatlaklı numunelerde ki ΔK_{II} 'ye göre değerler artış göstermiştir.

Şekil 7.30 ve 7.31. de ΔK_I , ΔK_{II} , $\Delta K_{I eş}$, $\Delta K_{II eş}$ derelerinin artan çatlak ilerleme miktarı ve çevrim sayısı ile birlikte arttığı görülmektedir. Fakat ilerleyen çevrimlerde çatlak ilerleme hızının azalmasından dolayı eğrilerin eğimi azalmıştır. Bunun nedeni çatlak körlenmesi ve dallanması ile fiberlerin çatlak ilerlemesini yavaşlatmasıdır.

45° açıda $\cos$ ve $\sin$ değerleri birbirine eşit olduğundan ve gerilme şiddet faktörleri de bunlara bağlı fonksiyonlar olduğundan ΔK_I ΔK_{II} 'ye, $\Delta K_{I eş}$ ise $\Delta K_{II eş}$ 'e eşit çıkmıştır.



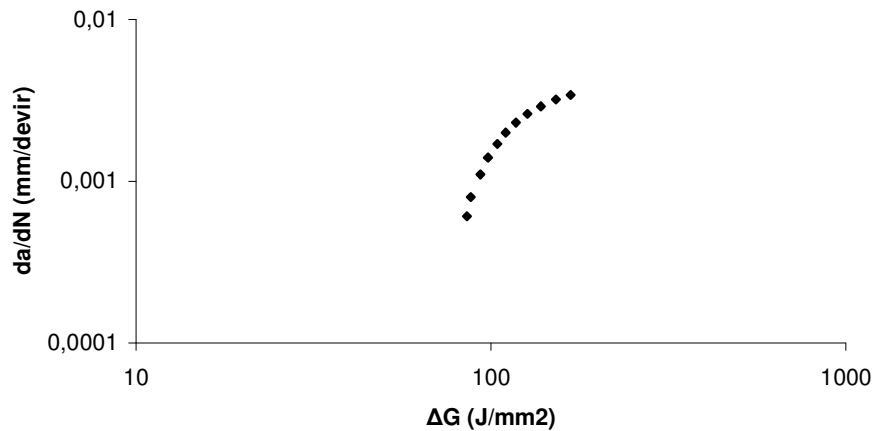
Şekil 7.31 45° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nın ΔK_{II} ve ΔK_{I} eş ile değişimi



Şekil 7.32 45° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nın $\Delta K_{eş}$ ile değişimi

x eksenine ile 45° açı yapan çatlaklı numunelerde bileşik mod da $\Delta K_{eş}$ değişimi çatlak ilerlemesi başlangıcında $N=1850$ ve $a_0=5.1$ mm iken $\Delta K_{eş}=93.91 \text{ MPa}\sqrt{m}$ iken, kararsız çatlak ilerlemesi başlangıcında $N=7350$ ve $\Delta a=2.51$ mm anında ise $\Delta K_{eş}=120.2 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.32 de 45° açılı çatlaklı numunenin da/dN çatlak ilerleme hızının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarları $\Delta K_{eş}$ e göre değişimi gösterilmiştir. Yatayla 45° açı yapan çatlaklı numunede $\Delta K_{eş}$ değerleri 0° açılı çatlaklı numuneye göre 38 %, 15° açılı çatlaklı numuneye göre 9.28 %, 30° açılı çatlaklı numuneye göre 15.6 % azalmıştır.

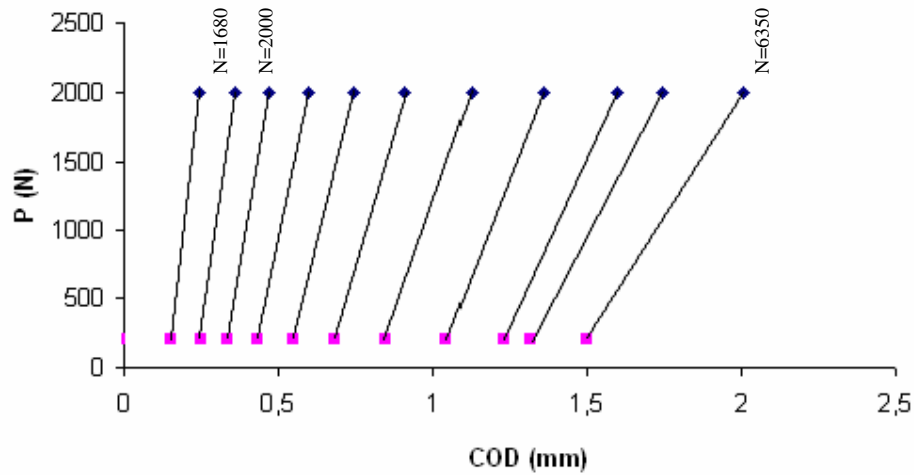
45° açılı çatlaklı numune için elde edilen ΔG değerleri EK I d de verilmiştir. Çatlak ilerlemesi başlangıcında $N=1850$ ve $a_0=5.1$ mm iken ΔG değeri 85.29 J/mm^2 iken, stabil olmayan çatlak ilerlemesinin başladığı $N=7350$ ve $\Delta a=2.51$ mm anında ise 167.75 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.33 te 45° açılı çatlaklı numunede çatlak ilerleme hızı da/dN nin ΔG ile değişimi gösterilmiştir. Burada ΔG değerleri yorulma çevrim sayısı arttıkça ve çatlak ilerledikçe artmaktadır. Ayrıca ΔG değerleri 0° açılı çatlaklı numuneye göre %16, 15° açılı çatlaklı numuneye göre 24.4 %, 30° açılı çatlaklı numuneye göre 19 % azalmıştır. Eğrinin eğimi ise azalma eğilimi göstermektedir. Çünkü çatlak ilerleme hızı, çatlak ucunun körelmesi ve çatlak dallanması ile fiberlerin çatlak ilerleyişini yavaşlatması sonucunda azalmıştır.



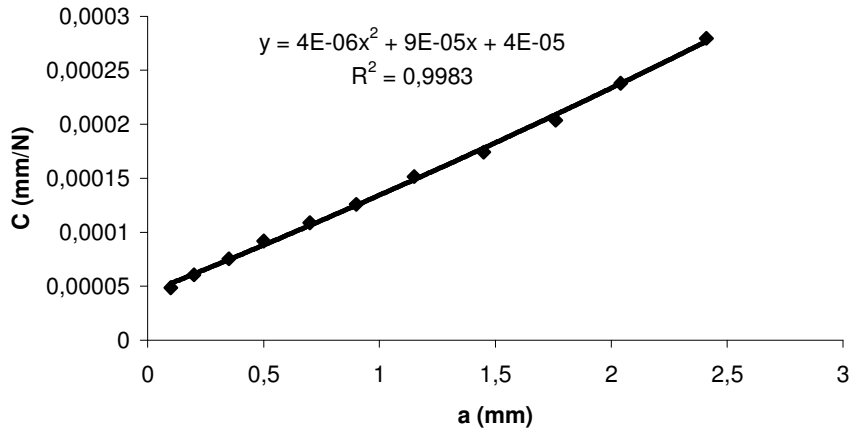
Şekil 7.33 45° açılı çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nin ΔG ile değişimi

7.12 45° çatlaklı numunelerde kompiyans yöntemiyle ΔG 'nin incelenmesi

Ortasında yatayla 45° açı yapacak şekilde çatlak bulunan numunelere kompiyans yöntemi kullanılarak ΔG değerleri hesaplanmıştır. Bu yöntemde önceki çatlaklı numunelerde için uygulanan ölçme ve kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Şekil 7.34 de görüldüğü gibi sabit çevrim aralıklarında $P_{\max}$ ve $P_{\min}$ yorulma yükü değerlerine karşılık gelen COD değerleri ölçülmüştür. Yorulma yükü ve ölçülen çatlak ağzı açılma miktarı değerleri ile P-COD grafiği çizilmiştir. Bu grafikte 45° çatlak için COD değerlerinin ilerlemesi gösterilmiştir, çatlak ilerlemeye başladığında $N=1850$ ve $a_0=5.1$ mm iken $P_{\max}$ için COD=0.06 mm ve $P_{\min}$ için COD=0.01 iken stabil olmayan çatlak ilerlemesinin başladığı $N=7350$ ve $\Delta a=2.51$ mm anında $P_{\max}$ için COD=2.00 mm ve $P_{\min}$ için COD=1.50 mm olmuştur. Aynı çevrim sayısında $P_{\max}$ ve $P_{\min}$ yorulma yükü değerlerine karşılık gelen COD değerleri bir eğri ile birleştirilmiştir. Her bir eğrinin eğiminin tersi alınarak numuneye ait kompiyans değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 7.34 45° çatlaklı numunenin P'nin COD ile değişimi

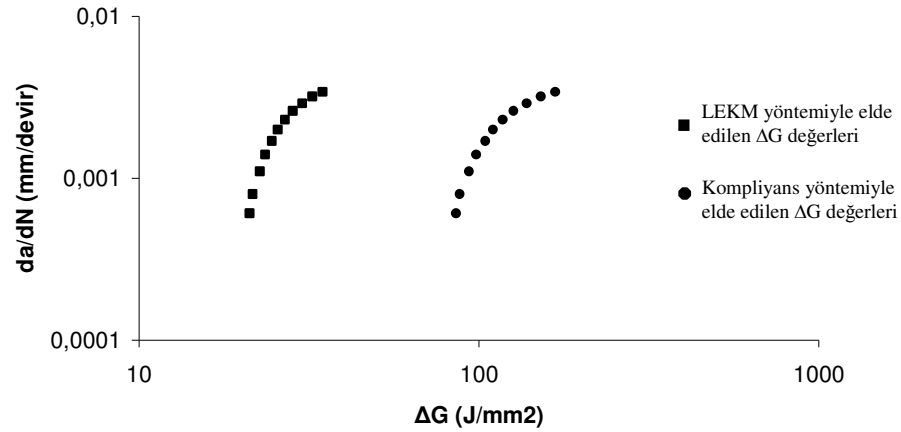


Şekil 7.35 45° çatlaklı numunelerde C'nin a ile değişimi

Hesaplanan C değerleri ve deney esnasında ölçülen çatlak ilerleme miktarı değerleri kullanılarak şekil 7.36 da görülen (C-a) grafiği çizilmiştir. Grafikten elde edilen eğriye Excel programı kullanılarak eğri uydurulmuş ve $C(a) = 4E-06x^2 + 9E-05x + 4E-05$ denklemi elde edilmiştir. Bu eğri denkleminin türevi alınarak dC/da değerleri hesaplanmış ve denklem (5.19) da yerine yazılarak ΔG değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 7.36 da yatayla 45° açı yapan çatlaklı numune için kompiyans yöntemi ve LEKM kullanılarak elde edilmiş $da/dN-\Delta G$ grafikleri görülmektedir. kompiyans yöntemi ile bulunan ΔG değerleri çatlak ilerlemesi başlangıcında $\Delta G = 85.59 \text{ J/mm}^2$ iken kararsız çatlak ilerlemesi başlangıcında ise $\Delta G = 167.75 \text{ J/mm}^2$ olarak bulunmuştur. ΔG değerleri çevrim sayısı ve çatlak ilerleme miktarı arttıkça artmıştır. Ayrıca ΔG değerleri 0° açılı çatlaklı numuneye göre 456 %, 15° açılı çatlaklı numuneye göre 310 %, 30° açılı çatlaklı numuneye göre 125 % artmıştır. Ancak daha önceki çatlaklı numunelerde bulunduğu gibi ΔG eğrisinin eğimi azalmıştır. Çatlak uçlarındaki körlenme ve dallanma çatlakın ilerlemesini yavaşlatmış ve eğrinin eğiminin azalmasına neden olmuştur.

LEKM kullanılarak elde edilen ΔG değerleri eşitlik (5.22) kullanılarak hesaplanmıştır. Yine LEKM kullanılarak oluşturulmuş ve şekil 7.36 da verilen 45° çatlaklı numune için $da/dN-\Delta G$ grafiği incelenecek olursa, çatlak ilerlemesi



Şekil 7.36 45° çatlaklı numunelerde da/dN 'nın ΔG ile değişimi

başlangıcında $\Delta G=21.1 \text{ J/mm}^2$ iken kararsız çatlak ilerlemesi başlangıcında ise $\Delta G=34.6 \text{ J/mm}^2$ olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak farklı iki kırılma mekaniği yöntemi kullanılarak hesaplanan ΔG değerlerinde çatlak ilerlemesi başlangıcında 75.3 % uyumsuzluk hesaplanırken kararsız çatlak ilerlemesi başlangıcında 79 % olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi iki yöntem arasında büyük farklılıklar bulunmaktadır. Kompozit malzeme elastik-plastik davranış sergilediği için LEKM ΔG değerlerinin hesaplanmasında yetersiz kalmış ve iki yöntem ile bulunan değerler arasında farklılıklar oluşmuştur. Çünkü LEKM gevrek malzemelerde kırılma davranışını karakterize etmektedir. Ancak sünek kırılma sergileyen malzemelerde yetersiz kalmaktadır.

7.13 45° çatlaklı numunelerde hasar mekanizması

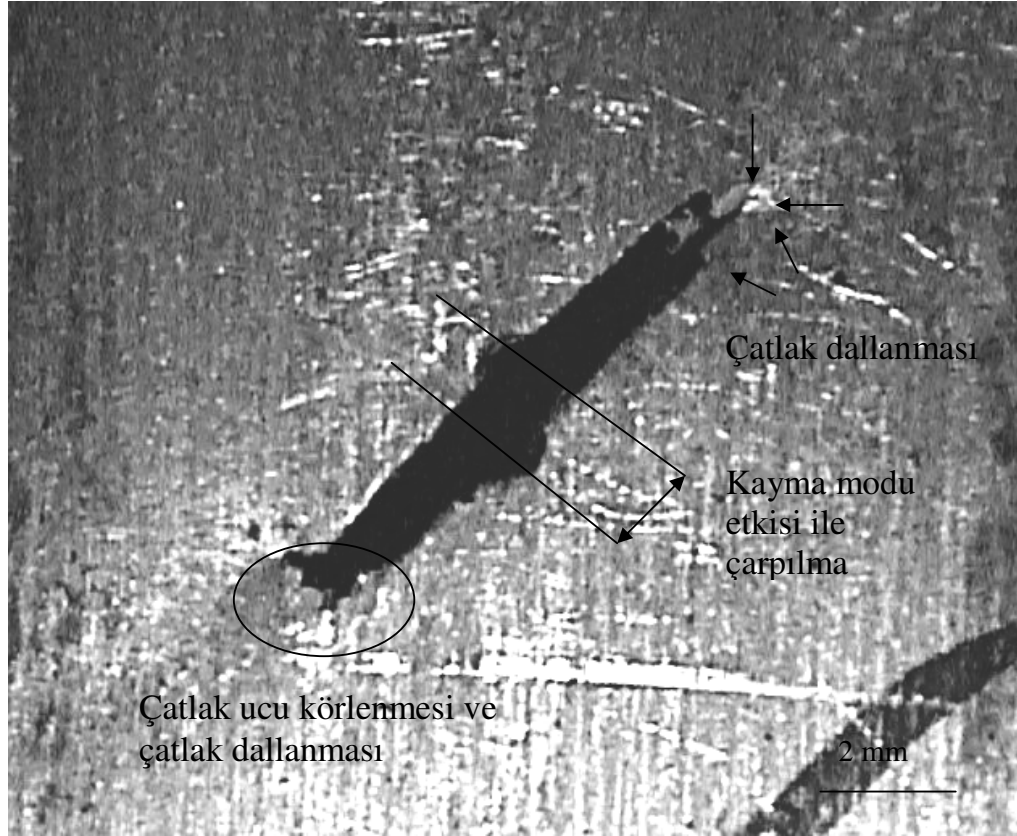
Üzerinde x eksenine ile 45° açı yapan çatlaklı numunede çatlakın yatayla ile yaptığı açı söz konusu olduğu için açılma ve kayma modlarında (mod I ve mod II) hasar gerçekleşmiştir. Ancak kayma modunun etkisi artmıştır. Açılma modunun etkisinin azalması nedeni ile çatlak ilerleme hızı düşmüştür.

45° açılı çatlaklı numunede ön yorulma çatlakı $N=1850$ çevrimde 0.1 mm olarak ölçülmüş ve ardından yorulma deneyine geçilmiştir. Yorulma ön çatlaklı açana kadar geçen çevrim sayında çatlak ağzı açılma miktarı $\Delta COD=0.24 \text{ mm}$ olarak ölçülmüştür.

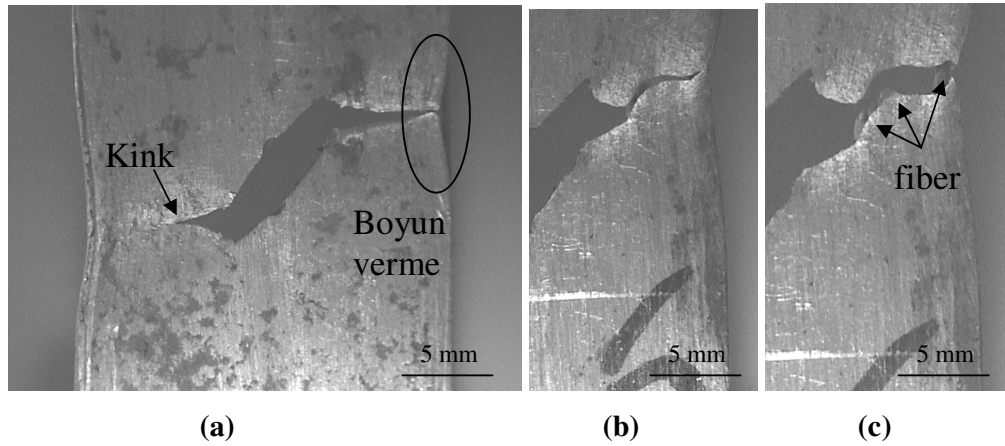
Yorulma deneyinde çevrim sayısı arttıkça çatlak ilerlemeden önce çatlak uçlarında beyaz bölge oluşmuş ve bu beyaz bölge büyümüştür. Bu bölge matristeki çekme gerilme yoğunlaşmasının görüldüğü bölgedir. Bu bölgede artan gerilme yoğunluğu matrisi elastik davranıştan plastik davranışa sokmuştur. Matrisin plastik olarak şekil değiştirdiği bu bölgeden çatlak ilerleyerek fibere ulaşmıştır. Çatlak ilerlemesi başlangıç çatlak düzlemine 45° açı yapacak şekilde kink yaparak ilerlemiştir.

Kayma modunun kırılma üzerine etkisi arttığı için çevrim sayısı ilerledikçe numune çarpılmıştır. Çarpılmanın da etkisi ile çatlak ucunda ilerleme yavaşlamış, şekil 7.37 de görüldüğü gibi çatlak ucu körlenmesi ve çatlak dallanması ortaya çıkmıştır. Çatlak uçlarındaki körlenme ve dallanma kayma moduna, matrisin plastik şekil değişimine bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Çatlağın dallanması sebebi ile ortaya çıkan küçük çatlaklar çatlak ilerlemesinin yavaşlatmış ve bu çatlaklar ilerleyebilmek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duymuşlardır. Bu nedenle ΔG değerleri sürekli artmıştır. Çatlağın fiberi aşma mekanizması daha önceki çatlaklı numunelerde olduğu gibi ortaya çıkmıştır. Çatlak önündeki fiberi kesmeden aşmıştır. Çatlak ilerlemesi hem ana çatlaktan hem çatlak dallanması ile oluşan küçük çatlardan devam etmiştir. Çatlağın fiber kesmeden aşması fiber-matris arayüzey ayrılmasının kanıtıdır. Yani çatlağın önündeki matriste oluşan çekme gerilme yoğunluğu matris tarafından fiberlere aktarılmış ve fiberlerde çekme gerilmeleri oluşurken fiber-matris arayüzeyinde kayma gerilmeleri meydana gelmiştir. Artan çevrim sayısı ile arayüzeydeki kayma gerilme yoğunluğu da artmış ve bu gerilme yoğunluğu arayüzey dayanımına ulaştığında fiber-matris ayrılması gerçekleşmiştir. Böylece çatlak fiberi kesmeden arayüzeyden ilerleyerek fiberi aşmıştır. Çatlak ilerleme düzlemi doğrultusunda matrisin dış kenarlarında genişlik yönünde daralma yani boyun verme gerçekleşmiştir. Şekil 7.38 de bu durum açıkça görülmektedir. Numunenin boyun vermesi deney esnasında numunenin plastik olarak uzamadığının ve sünek davranış gösterdiğinin kanıtıdır.

Çatlak ilerleme miktarı $\Delta a = 2.51$ mm ye ulaştığında fiberler birkaç saniye içinde kopmuş ve çatlak kararsız ilerleme bölgesine girmiştir. Bu andan itibaren numune kırılmıştır.



Şekil 7.37 45° çatlaklı kompozit malzemede çatlak dallanması ve körlenmesi



Şekil 7.38 Kırılma sonrası 45° çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

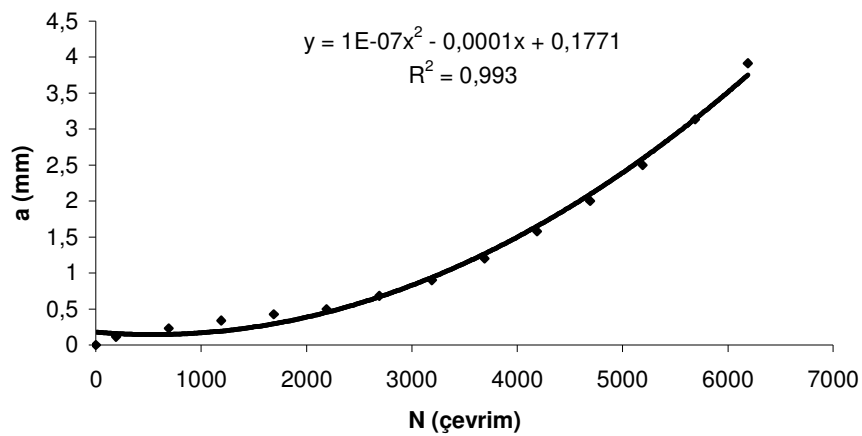
- a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi
- b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında matris yırtılması
- c-) Fiber sıyrılması

7.14 60° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG nin İncelenmesi

Ortasında x eksenine ile 60° açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan numuneler $R = 0.1$ gerilme oranında ve $f = 0.65$ frekansta yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Öncelikle numune de 1810 yorulma çevrim sayısında ve çatlak 0.1 mm ye ulaştığında yorulma ön çatlak oluşmuş ve yorulma durdurulmuştur. Daha sonra normal yorulma deneyine geçilmiştir.

Diğer numunelerde de ki ölçme yöntemleri uygulanmış ve yorulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.39 da verilmiştir. Bu grafikten çatlak 5500 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. Bu da çatlak kararlı olmayan bölgeye yaklaştığını göstermektedir.

60° açılı çatlaklı numune ortalama 7950 çevrim sayısında çatlak $a = 8.91$ mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur. Yorulma ömrü çevrim sayısı yatayla 60° açı yapan çatlaklı numunelerde, 0° açılı çatlaklı numunelere göre 213 %, 15° açılı çatlaklı numunelere göre 14 %, 30° açılı çatlaklı numunelere göre 52 %, 45° açılı çatlaklı numuneye göre 26 % artmıştır.



Şekil 7.39 60° açılı çatlaklı kompozit malzemenin a 'nın N ile değişimi

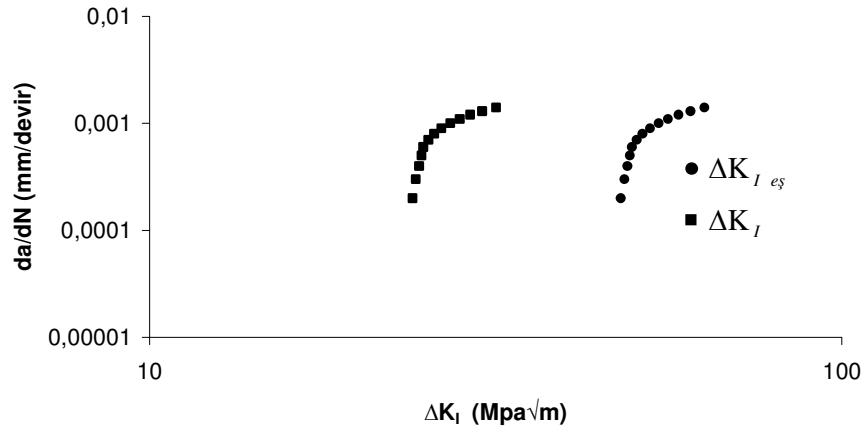
Şekil 7.39 da görülen a-N grafiğinden Excel programı yardımıyla çatlak ilerleme miktarının çevrim sayısı ile değişimi denklemi olan $a(N) = 1E-07x^2 - 0,0001x + 0,1771$ elde edilmiştir. Bu denklemin türevi alınarak çatlak ilerleme hızı olan da/dN değerleri elde edilmiştir.

Yatayla 60° açı yapan çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi 15° , 30° ve 45° olduğu gibi çatlak düzlemi boyunca olmayıp numune eksenine dik yönde, 60° açı yapacak şekilde, kink yaparak ilerlemiştir. Diğer numuneler için kullanılan eşitliklerden ΔK_I , $\Delta K_{I_{eş}}$, ΔK_{II} , $\Delta K_{II_{eş}}$ ve $\Delta K_{eş}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler EK I e de verilmiştir.

Şekil 7.40 ta da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_I ve $\Delta K_{I_{eş}}$ göre değişiminin grafiği logaritmik eksen de gösterilmiştir. Çatlak ilerlemesi başlangıcı olan $N=1810$ çevrim ve $a_0=5.11$ mm iken $\Delta K_I=23.98$ $MPa\sqrt{m}$, $\Delta K_{I_{eş}}=47.96$ $MPa\sqrt{m}$, kararsız çatlak ilerlemesinin başladığı $N=7950$ çevrim ve $\Delta a=4.01$ mm anında ise $\Delta K_I=31.66$ $MPa\sqrt{m}$, $\Delta K_{I_{eş}}=63.33$ $MPa\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Kink açısına bağlı olarak hesaplanan $\Delta K_{I_{eş}}$ değerleri, ΔK_I değerlerinden büyük çıkmıştır. Şekil 7.40 tan artan çevrim sayısı ve ilerleme miktarı ile birlikte eğrinin eğiminin azaldığı görülmektedir. yani çatlak ilerleme hızındaki artış azalmıştır. Bunun sebebi çatlak ucu önündeki plastik bölge, çatlak körlenmesi ve dallanmasıdır.

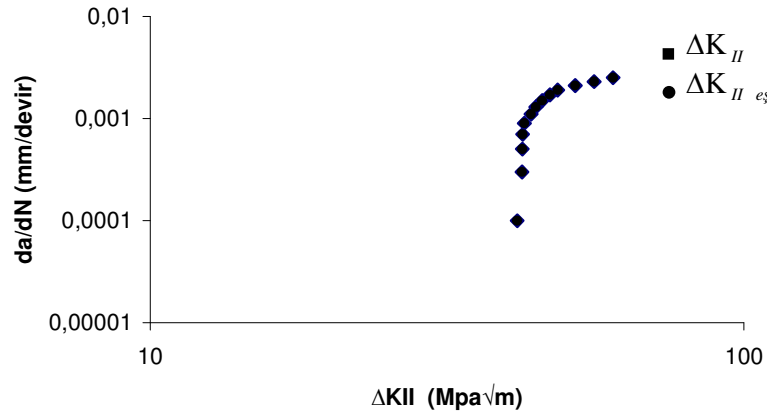
Şekil 7.41 de ise da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_{II} ve kink açısının etkisi dikkate alınarak hesaplanan $\Delta K_{II_{eş}}$ göre değişimi gösterilmiştir. Çatlak ilerlemesi başlangıcı olan $N=1810$ çevrim ve $a_0=5.11$ mm iken $\Delta K_{II}=41.53$ $MPa\sqrt{m}$, $\Delta K_{II_{eş}}=41.53$ $MPa\sqrt{m}$ iken, kararsız çatlak ilerlemesinin başladığı $N=7950$ çevrim ve $\Delta a=4.01$ mm anında $\Delta K_{II}=54.84$ $MPa\sqrt{m}$, $\Delta K_{II_{eş}}=54.84$ $MPa\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Yani $\Delta K_{II_{eş}}$, ΔK_{II} 'ye eşit çıkmıştır. Bunun sebebi kink olayının etkisinin bulunması için kullanılan Sole fonksiyonlarıdır.

Şekil 7.41 incelendiğinde gerek ΔK_{II} ve gerekse $\Delta K_{II_{eş}}$ değerlerinin yorulma deneyinin başlangıcından stabil olmayan çatlak ilerlemesinin başlangıcına

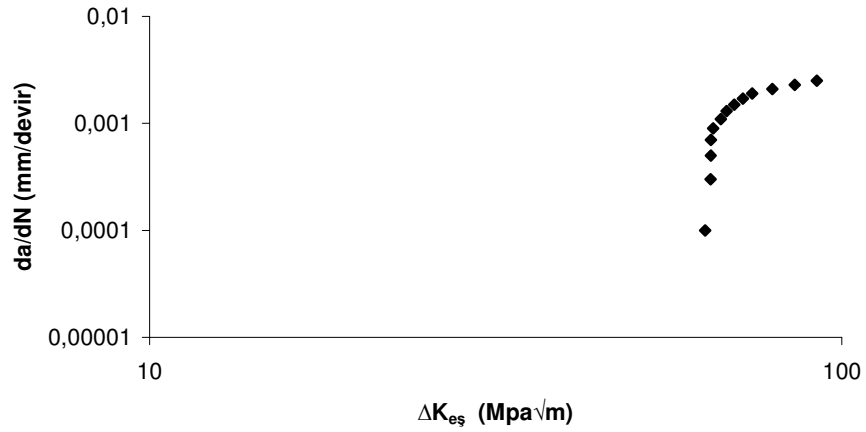


Şekil 7.40 60° çatlaklı kompozit malzemenin da/dN 'nın ΔK_I ile değişimi

kadar arttığı belirlenmiştir. Ancak eğrinin eğimi azalmaktadır. Çünkü çatlak ucundaki plastik bölgenin değişimi, çatlak körlenmesi ve çatlak dallanması gibi olaylar çatlak ilerleme hızını azaltmıştır.

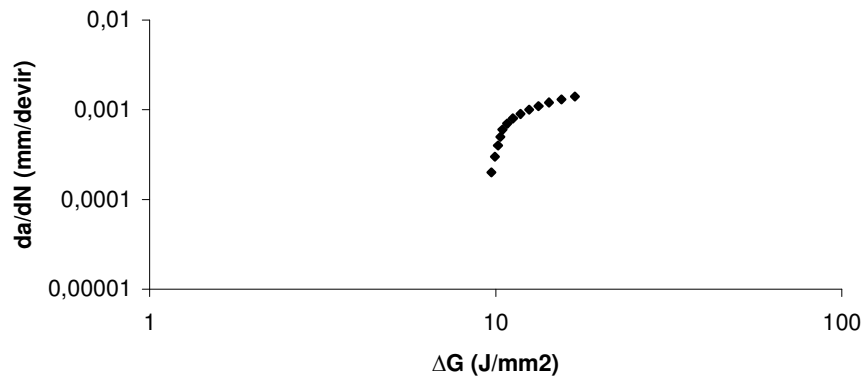


Şekil 7.41 60° çatlaklı kompozit malzemenin da/dN 'nın ΔK_{II} ile değişimi



Şekil 7.42 60° çatlaklı kompozit malzemenin da/dN 'nin $\Delta K_{\epsilon s}$ ile değişimi

Açılma ve kayma modlarının birlikte etkisinin hesaplandığı $\Delta K_{\epsilon s}$ değerlerinin çatlak ilerleme hızı ile değişimi Şekil 7.42 de verilmiştir. Çatlak ilerlemesi başlangıcı olan $N=1810$ çevrim ve $a_0=5.11$ mm iken $\Delta K_{\epsilon s}=63.44 \text{ MPa}\sqrt{m}$ değerinden, kararsız çatlak ilerlemesinin başladığı $N=7950$ çevrim ve $\Delta a=4.01$ mm anında $\Delta K_{\epsilon s}=83.78 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ye kadar artış göstermiştir. Yorulma deneyinin başlangıcından stabil olmayan çatlak ilerlemesinin başlangıcına kadar $\Delta K_{\epsilon s}$ değerlerinin arttığı



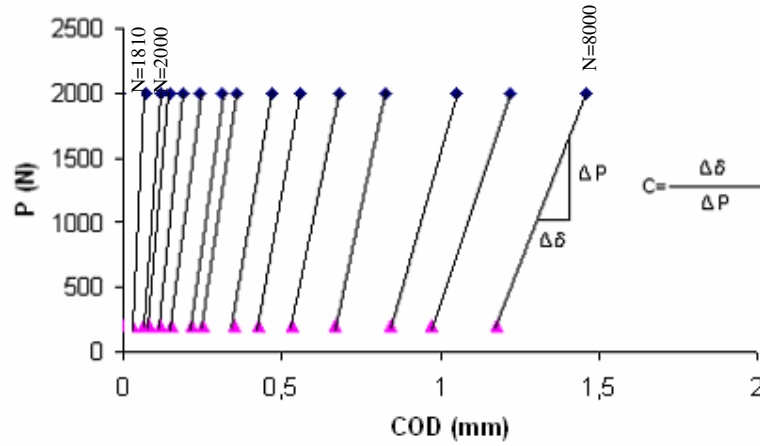
Şekil 7.32 60° çatlaklı kompozit malzemenin da/dN 'nin ΔG ile değişimi

belirlenmiştir. Yatayla 60° açılı yapan çatlaklı numunelerde $\Delta K_{eş}$ değerleri 0° açılı çatlaklı numunelere göre 60 %, 15° açılı çatlaklı numunelere göre 53.5 %, 30° açılı çatlaklı numunelere göre 45 %, 45° açılı çatlaklı numunelere göre 35 % azalmıştır. Ancak eğrinin eğimi azalmaktadır. Çünkü çatlak ucundaki plastik bölgenin değişimi, çatlak körlenmesi ve çatlak dallanması gibi olaylar çatlak ilerleme hızını azaltmıştır.

60° açılı çatlaklı numune için elde edilen ΔG değerleri EK I e de verilmiştir. Başlangıçta ΔG değerleri 9.71 J/mm^2 iken, kırılma anında 16.94 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. 60° açılı çatlaklı numunenin ΔG değerleri 0° açılı çatlaklı numunelere göre 59 %, 15° açılı çatlaklı numunelere göre 63 %, 30° açılı çatlaklı numunelere göre 60 %, 45° açılı çatlaklı numunelere göre 51 % azalmıştır. Şekil 7.32 de 60° açılı çatlaklı numunede çatlak ilerleme hızı da/dN nin ΔG ile değişimi gösterilmiştir.

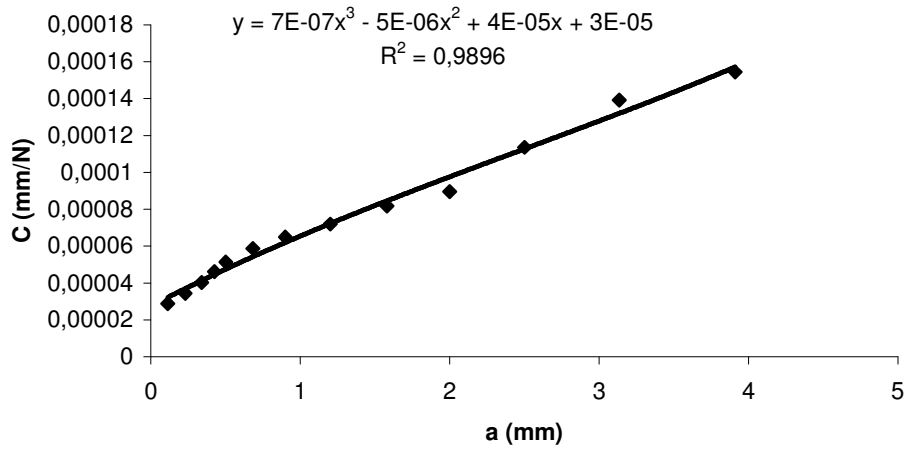
7.15 60° Çatlaklı Numunelerde Kompliyans Yöntemiyle ΔG 'nin İncelenmesi

Ortasında yatayla 60° açılı yapan kalınlık yönünde boydan boya açılmış çatlak bulunan numunelere kompliyans yöntemi uygulanmıştır. Diğer çatlaklı numunelerde olduğu gibi sabit gerilme oranında ($R=0.1$) yorulma deneyi uygulanmıştır. Her 500 çevrimde yorulma yükleri $P_{max}=2000 \text{ N}$ ve $P_{min}=200 \text{ N}$ karşılık gelen COD miktarları ve çatlak ilerleme miktarı ölçülmüştür. Şekil 7.43 te görüldüğü gibi P-COD grafiği çizilmiştir. Bu grafikte x eksenini ile 60° açılı yapan çatlaklı numune için COD değerlerinin yorulma yükleri P_{max} ve P_{min} 'e göre değişimi gösterilmiştir. Ön yorulma çatlak oluştuğunda yani $N=1810$ çevrimde $P_{max}=2000 \text{ N}$ iken, $COD=0.090$ ve $P_{min}=200 \text{ N}$ da, $COD=0.03 \text{ mm}$ olarak ölçülmüştür. Yorulma çevrim sayısı arttıkça çatlak ağzı açılma miktarı da artmıştır. Öyle ki kararsız çatlak uzaması başladığında yani $N=7950$ çevrimde $P_{max}=2000 \text{ N}$ iken, $COD=1.45 \text{ mm}$ ve $P_{min}=200 \text{ N}$ da $COD=1.18 \text{ mm}$ olmuştur. Yatayla 60° açılı yapan çatlaklı numunede yorulma yükü çatlak düzlemine 60° eğik geldiği için çatlak ağzının açılmasında yükün etkisi diğer çatlaklı numunelere göre azalmıştır.



Şekil 7.43 60° çatlaklı numunenin P'nin COD ile değişimi

Sabit çevrim aralıklarında $P_{\max}$ ve $P_{\min}$ yorulma yükü değerlerine karşılık gelen COD değerleri ölçülerek şekil 7.43 te görülen P-COD grafiği elde edilmiştir. Aynı çevrim sayında ölçülen $P_{\max}$ ve $P_{\min}$ yorulma yüklerine karşılık gelen bir eğri ile birleştirilmiştir. Her bir eğrinin eğiminin tersi alınarak numuneye ait kompiyans değerleri hesaplanmıştır.

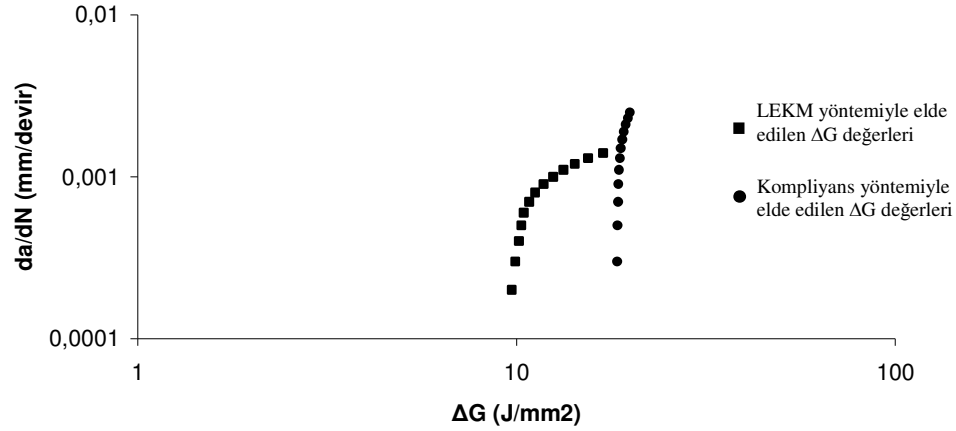


Şekil 7.44 60° çatlaklı numunelerde C'nin a ile değişimi

Hesaplanan kompiyans değerleri ile aynı çevrim sayında ölülen çatlak ilerleme miktarı değerleri kullanılarak ekil 7.44 te görülen C-a grafiği çizilmiştir. Bu grafiğe Excel programı kullanılarak eğri uydurulmuştur. Elde edilen eğri kompiyansın çatlak ilerleme miktarı ile değişimini gösteren eğridir ve $C(a) = 7E-07x^3 - 5E-06x^2 + 4E-05x + 3E-05$ olarak bulunmuştur. Bu denklemin türevi alınarak dC/da değerleri elde edilmiş ve eşitlik (5.19) da yerine yazılarak ΔG değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 7.45 de x ekseni ile 60° açı yapan çatlaklı numune için kompiyans yöntemiyle ve LEKM kullanılarak elde edilmiş $da/dN-\Delta G$ grafikleri görülmektedir. Kompiyans yöntemi ile elde edilen ΔG değerleri çatlak ilerlemesinin başlangıcında $N=1810$ evrim ve $a_0=5.11$ mm iken $\Delta G = 18.4$ J/mm² iken kararsız çatlak ilerlemesinin başladığı $N=7950$ ve $\Delta a=4.01$ anında ise $\Delta G=19.6$ J/mm² olarak bulunmuştur. Grafikten de görüldüğü gibi ΔG değerleri başlangıçtan kırılma anına kadar artmıştır. x ekseni ile 60° açı yapan çatlaklı numunelerde ΔG değerleri 0° açılı çatlaklı numunelere göre 34 %, 15° açılı çatlaklı numunelere göre 51 %, 30° açılı çatlaklı numunelere göre 73 %, 45° açılı çatlaklı numunelere göre 88 % azalmıştır. Artan ΔG değerleri göstermiştir ki yorulma çatlağı ilerleyebilmek için çevrim sayısı arttıkça daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Çünkü kompozit malzemede fiberler çatlağın önünü kesmiş, çatlak ucunda krlenme ve dallanma meydana gelmiştir.

LEKM kullanılarak elde edilen ΔG değerleri eşitlik (5.22) kullanılarak hesaplanmıştır. Yine LEKM kullanılarak oluşturulmuş ve ekil 7.46 da verilen 60° çatlaklı numune için $da/dN-\Delta G$ grafiği incelenecek olursa, çatlak ilerlemesinin başlangıcında $N=1810$ evrim ve $a_0=5.11$ mm iken $\Delta G=9.7$ J/mm² iken kararsız çatlak ilerlemesinin başladığı $N=7950$ ve $\Delta a=4.01$ anında ise $\Delta G=16.9$ J/mm² olarak bulunmuştur. İki yöntem arasındaki farklılık çatlak ilerleme başlangıcında 47.2 % iken kararsız çatlak ilerlemesi başlangıcında 13.7 % olmuştur.



Şekil 7.45 60° çatlaklı numunelerde da/dN 'nin ΔG ile değişimi

7.16 60° Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

Üzerinde x ekseni ile 60° açı yapan çatlaklı numunede çatlağın yatayla ile yaptığı açı söz konusu olduğu için açılma ve kayma modlarında (mod I ve mod II) hasar gerçekleşmiştir. Ancak kayma modunun etkisi artmıştır. Açılma modunun etkisinin azalması nedeni ile çatlak ilerleme hızı düşmüştür.

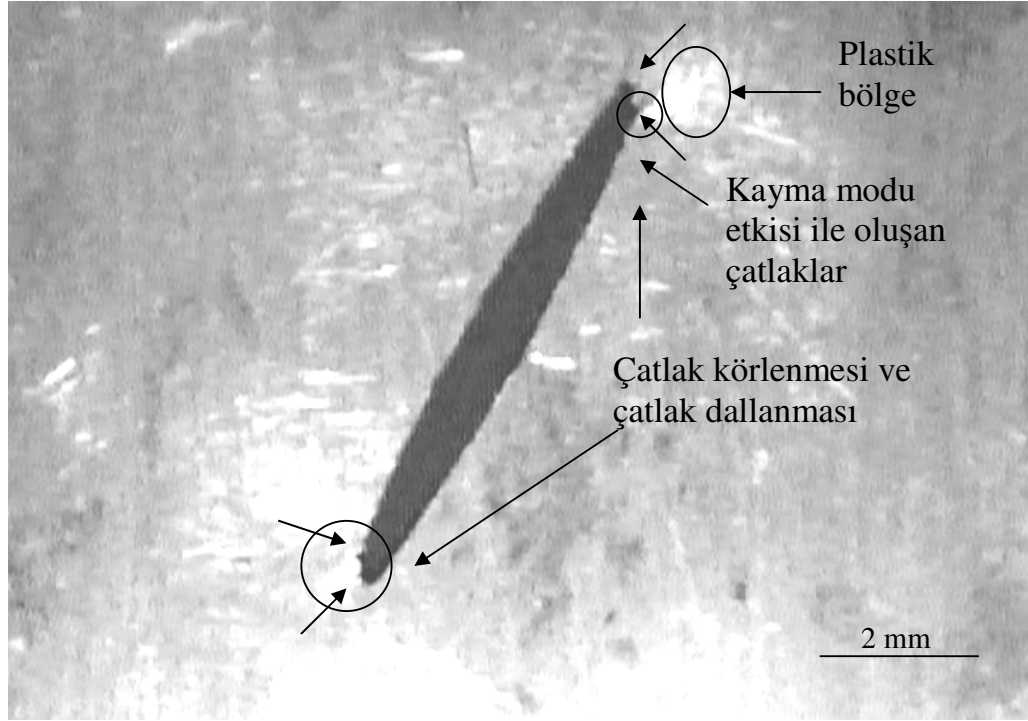
60° açılı çatlaklı numunede ön yorulma çatlağı $N=1810$ çevrimde 0.1 mm olarak ölçülmüş ve ardından yorulma deneyine geçilmiştir. Yorulma ön çatlağı açana kadar geçen çevrim sayında çatlak ağzı açılma miktarı $\Delta COD=0.11$ mm olarak ölçülmüştür.

Yorulma deneyinde çevrim sayısı arttıkça çatlak ilerlemeden önce çatlak uçlarında beyaz bölge oluşmuş ve bu beyaz bölge büyümüştür. Bu bölge matristeki çekme gerilme yoğunlaşmasının görüldüğü bölgedir. Bu bölgede artan gerilme yoğunluğu matrisi elastik davranıştan plastik davranışa sokmuştur. Matrisin plastik olarak şekil değiştirdiği bu bölgeden çatlak ilerleyerek fibere ulaşmıştır. Çatlak ilerlemesi başlangıç çatlak düzlemine 60° açı yapacak şekilde kink yaparak ilerlemiştir.

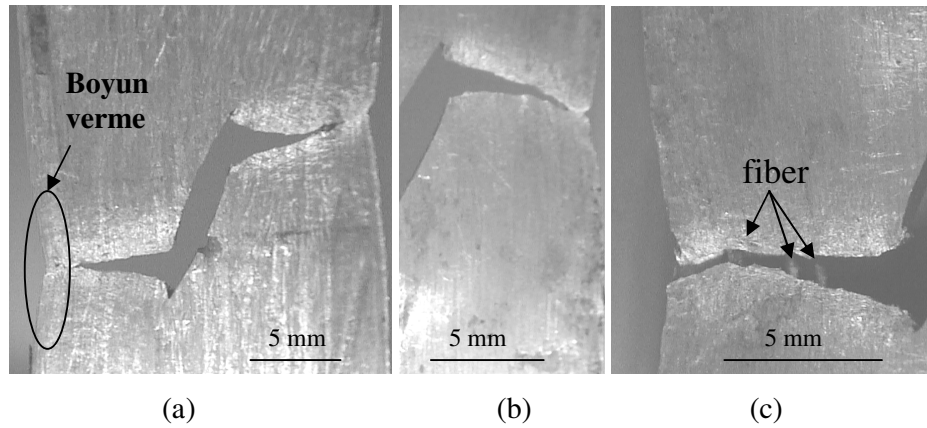
Kayma modunun kırılma üzerine etkisi arttığı için çevrim sayısı ilerledikçe numune çarpılmıştır. Çarpılmanın da etkisi ile çatlak ucunda ilerleme yavaşlamış, şekil 7.37 de görüldüğü gibi çatlak ucu körlenmesi ve çatlak dallanması ortaya çıkmıştır. Çatlak uçarındaki körlenme ve dallanma kayma moduna, matrisin plastik şekil değişimine bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Çatlağın dallanması sebebi ile ortaya çıkan küçük çatlaklar çatlak ilerlemesinin yavaşlatmış ve bu çatlaklar ilerleyebilmek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duymuşlardır. x eksenine ile 60° açı yapan çatlaklı numunede kayma modunun etkisi çok belirgindir. Çatlak ilerlemesi makine ile açılan çatlak ucundan değil daha aşağıda bir bölgede kayma modu etkisi ile oluşan çatlaktan devam etmiştir. Numunenin kırılmasının sebebi de kayma modu etkisi ile oluşan çatlaktır. Şekil 7.46 da çatlak ucunun körelmesi ve dallanması gösterilmiştir. Şekilden görülmektedir ki makine ile açılan çatlağın ucundaki plastik bölge kayma modunun etkisi ile oluşan diğer çatlağa göre çok daha küçüktür. Bu da kırılmanın ana çatlağın kayma modu ile oluşan çatlak olduğunu ortaya koymaktadır.

Çatlağın fiberi aşma mekanizması daha önceki çatlaklı numunelerde olduğu gibi ortaya çıkmıştır. Çatlak önündeki fiberi kesmeden aşmıştır. Çatlak ilerlemesi hem ana çatlaktan hem çatlak dallanması ile oluşan küçük çatlardan devam etmiştir. Çatlağın fiber kesmeden aşması fiber-matris arayüzey ayrılmasının kanıtıdır. Yani çatlağın önündeki matriste oluşan çekme gerilme yoğunluğu matris tarafından fiberlere aktarılmış ve fiberlerde çekme gerilmeleri oluşurken fiber-matris arayüzeyinde kayma gerilmeleri meydana gelmiştir. Artan çevrim sayısı ile arayüzeydeki kayma gerilme yoğunluğu da artmış ve bu gerilme yoğunluğu arayüzey dayanımına ulaştığında fiber-matris ayrılması gerçekleşmiştir. Böylece çatlak fiberi kesmeden arayüzeyden ilerleyerek fiberi aşmıştır. Kırılma yüzeyi incelendiğinde fiber matris ayrılması sonucu sıyrılmış fiberler görülmüştür. Çatlak ilerleme düzlemi doğrultusunda matrisin dış kenarlarında genişlik yönünde daralma yani boyun verme gerçekleşmiştir. Şekil 7.47 (a) da bu durum açıkça görülmektedir. Numunenin boyun vermesi deney esnasında numunenin plastik olarak uzamadığının ve sünek davranış gösterdiğinin kanıtıdır.

Çatlak ilerleme miktarı $\Delta a = 4.01$ mm ye ulaştığında fiberler birkaç saniye içinde kopmuş ve çatlak kararsız ilerleme bölgesine girmiştir. Bu andan itibaren numune kırılmıştır.



Şekil 7.46 60° çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi



Şekil 7.47 Kırılma sonrası 60° çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

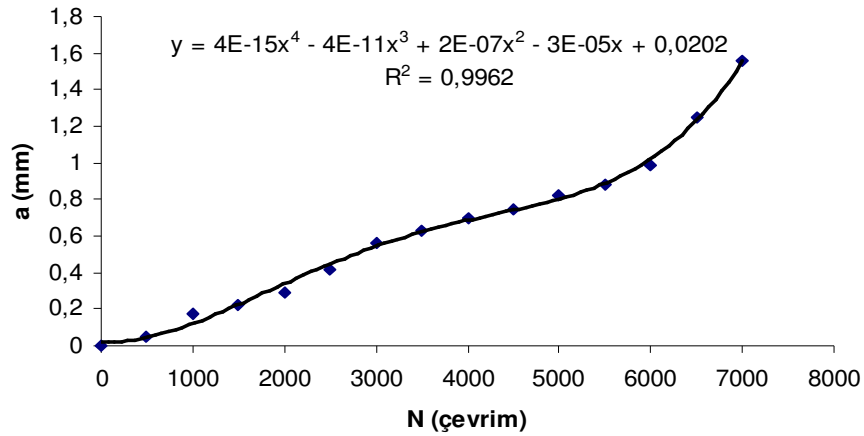
- a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi
- b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında matris yırtılması
- c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

7.17 75° Açılı Çatlaklı Numunelerde LEKM Yöntemi ile ΔK ve ΔG 'nin İncelenmesi

Merkezinde yatayla 75° açı yapacak şekilde kalınlığı boyunca çatlak açılan kompozit numuneler $R=0.1$ gerilme oranında ve $f=0.65$ frekansta yorulma deneyine tabi tutulmuştur. Öncelikle bu numune de yorulma deneyi yapabilmek için yorulma ön çatlağı açılmış ve çatlak 5980 yorulma çevrim sayısında 0.1 mm ye ulaştığında yorulma durdurulmuştur. Daha sonra normal yorulma deneyine geçilmiştir.

Diğer açılı numunelerde ki ölçme yöntemleri uygulanmış ve yorulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen yorulma çevrim sayılarına karşılık, çatlak ilerleme miktarının grafiği şekil 7.48 de verilmiştir. Bu grafikten çatlağın 6000 çevrim sayısına kadar kararlı olduğunu, bundan sonra hızlandığını görmekteyiz. 75° açılı çatlaklı numunede ortalama 7000 çevrim sayısında çatlak $\Delta a=1.66$ mm ye ulaştığı anda kararlı olmayan çatlak ilerlemesi pozisyonuna girerek numune aniden kopmuştur. Yorulma ömrü çevrim sayısı yatayla 75° açı yapan çatlaklı numunelerde, 0° açılı çatlaklı numunelere göre 331 %, 15° açılı çatlaklı numunelere göre 57 % , 30° açılı çatlaklı numunelere göre 108 %, 45° açılı çatlaklı numuneye göre 73 %, 60° açılı çatlaklı numuneye göre 37.5 % artmıştır.

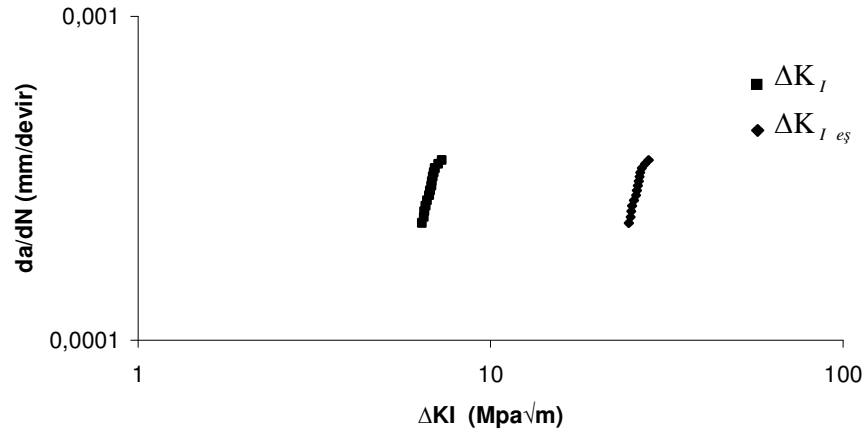
Şekil 7.48 de görülen $a-N$ grafiğine Excel programı yardımı ile eğri uydurulmuş ve $a(N)=4E-15x^4 - 4E-11x^3 + 2E-07x^2 - 3E-05x + 0,0202$ grafiği elde edilmiştir. Bu eğri denkleminin türevi alınarak çatlak ilerleme hızı da/dN elde edilmiştir.



Şekil 7.48 75° açılı çatlaklı kompozit malzemenin a'nın N ile değişimi

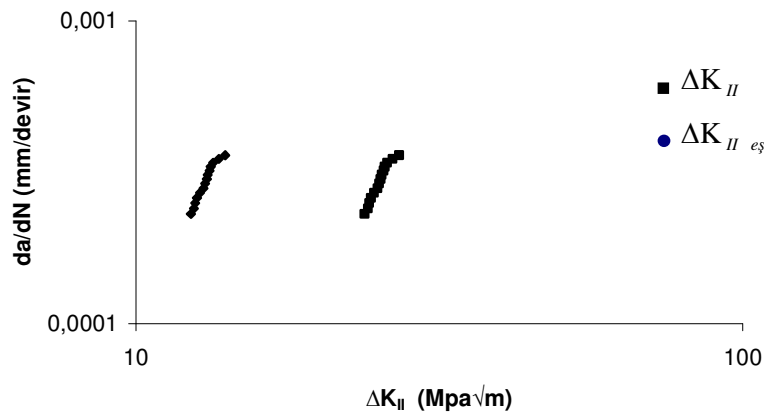
Yatayla 75° açı yapan çatlaklı numunelerde çatlak ilerlemesi, diğer açılı çatlaklı numunelerde olduğu gibi çatlak düzlemi boyunca olmayıp, numune eksenine dik yönde ve 75° açıyla kink yapacak şekilde ilerlemiştir. Yine diğer açılı çatlaklı numuneler için kullanılan eşitliklerden ΔK_I , $\Delta K_{I\ e\varnothing}$, ΔK_{II} , $\Delta K_{II\ e\varnothing}$ ve $\Delta K_{e\varnothing}$ değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler EK I f de verilmiştir.

Şekil 7.49 da da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_I ve $\Delta K_{I\ e\varnothing}$ göre değişimi değişiminin grafiği logaritmik eksen de gösterilmiştir. Çatlak ilerlemesinin başladığı N=5980 çevrim ve $a_0=5.1$ mm iken $\Delta K_I=6.38\text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ e\varnothing}=24.65\text{ MPa}\sqrt{m}$ iken, kararsız çatlak ilerlemesinin başladığı N=13000 çevrim ve $\Delta a=1.61$ anında ise $\Delta K_I=7.28\text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{I\ e\varnothing}=28.09\text{ MPa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. Burada gerek ΔK_I ve gerekse $\Delta K_{I\ e\varnothing}$ 'in artmasıyla çatlak ilerleme hızıyla artmıştır.



Şekil 7.49 75° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nın ΔK_I ve $\Delta K_{I eş}$ ile değişimi

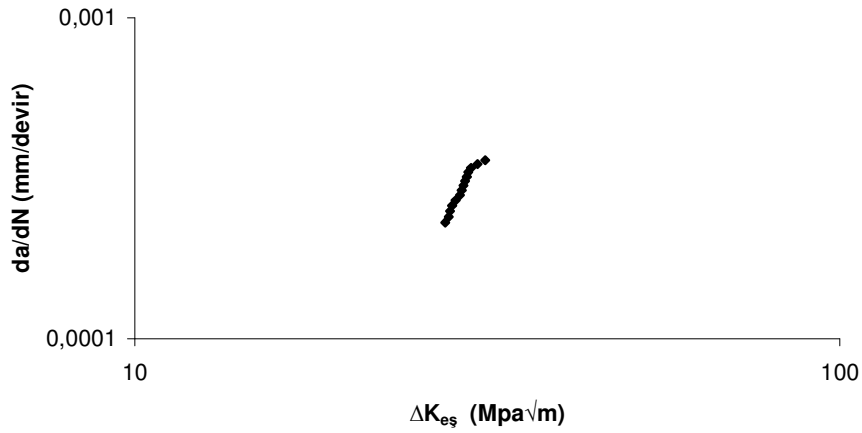
Şekil 7.49 de ise da/dN çatlak ilerleme hızının, gerilme şiddet faktörü değişim miktarları ΔK_{II} ve $\Delta K_{II eş}$ göre değişimi gösterilmiştir. Çatlak ilerlemesinin başladığı $N=5980$ çevrim ve $a_0=5.1$ mm iken $\Delta K_{II}=23.83 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{II eş}=12.31 \text{ MPa}\sqrt{m}$ iken, kararsız çatlak ilerlemesinin başladığı $N=13000$ çevrim ve $\Delta a=1.61$ anında ise $\Delta K_{II}=27.16 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $\Delta K_{II eş}=14.03 \text{ MPa}\sqrt{m}$ olarak bulunmuştur. ΔK_{II} nin $\Delta K_{II eş}$ den büyük çıkması kink açısının büyük olması ve Sole fonksiyonlarının etkisinden kaynaklanmıştır.



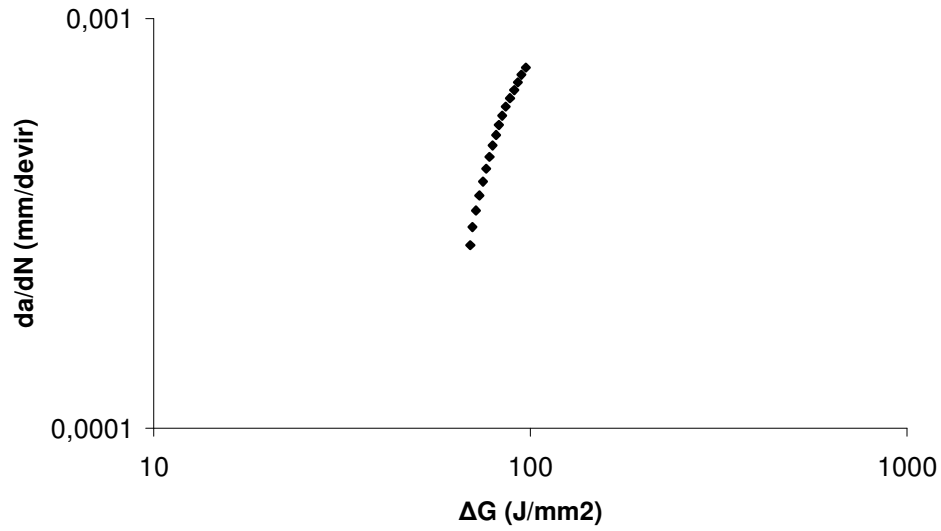
Şekil 7.50 75° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nın ΔK_{II} ve $\Delta K_{II eş}$ ile değişimi

Şekil 7.49 ve şekil 7.50 incelenirse ΔK değerlerinin yorulma çevrimi başlangıcından kararsız çatlak büyümesinin başlangıcına kadar artış göstermektedir. Ancak eğrilerin eğimi çatlak hızı ilerleme hızının azalmasından dolayı azalmıştır. Çatlak ilerleme hızının azalmasının sebebi ise çatlak ucundaki plastik deformasyon bölgesi, fiberlerin çatlak ilerleme hızını azaltması, çatlak ucunda görülen körlenme ve dallanma olaylarıdır.

75° açılı çatlaklı numunede bileşik mod da $\Delta K_{eş}$ değişimi Çatlak ilerlemesinin başladığı $N=5980$ çevrim ve $a_0=5.1$ mm iken $\Delta K_{eş}=27.55 \text{ MPa}\sqrt{m}$ iken, $N=13000$ çevrim ve $\Delta a=1.61$ anında ise $\Delta K_{eş}=31.40 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.50 da 75° açılı çatlaklı numunenin da/dN çatlak ilerleme hızının, eşdeğer gerilme şiddet faktörü değişim miktarları $\Delta K_{eş}$ e göre değişimi gösterilmiştir. Yatayla 75° açı yapana çatlaklı numunelerde $\Delta K_{eş}$ değerleri 0° açılı çatlaklı numunelere göre 78.5 %, 15° açılı çatlaklı numunelere göre 75 %, 30° açılı çatlaklı numunelere göre 70 %, 45° açılı çatlaklı numunelere göre 65 %, 60° açılı çatlaklı numunelere göre 46 % azalmıştır.



Şekil 7.50 75° çatlaklı kompozit malzemede da/dN 'nın $\Delta K_{eş}$ ile değişimi

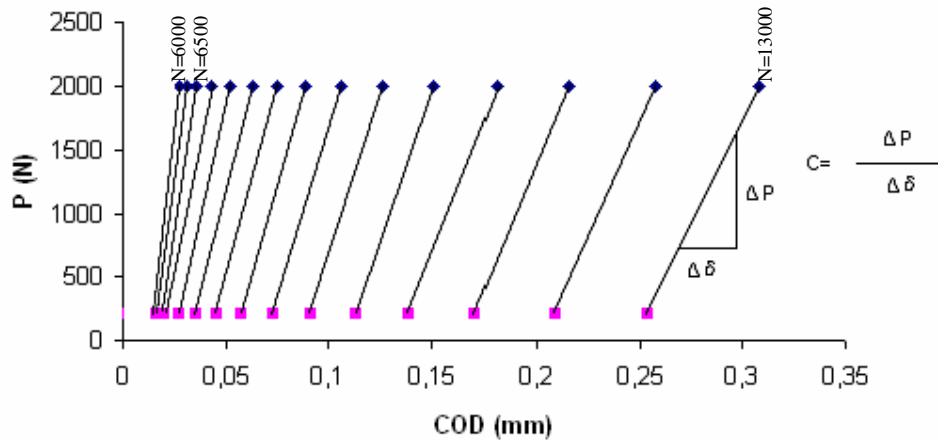


Şekil 7.51 75° çatlaklı kompozit malzemenin da/dN 'nın ΔG ile değişimi

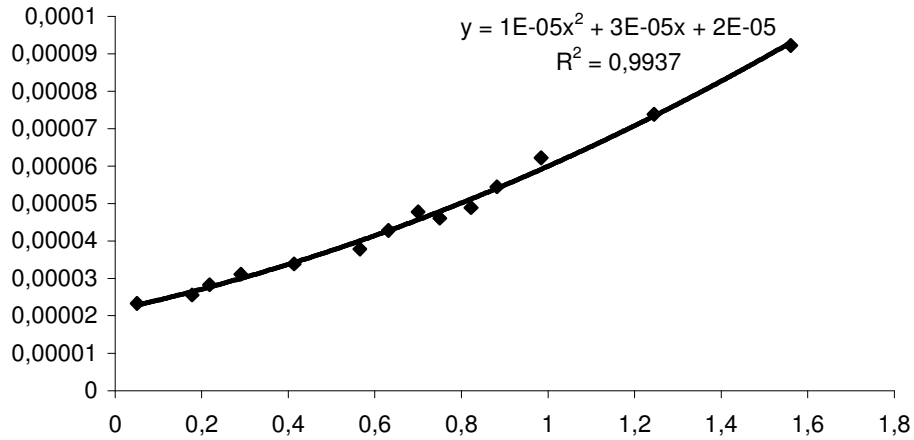
75° açılı çatlaklı numune için eşitlik (5.22) kullanılarak hesaplanan ΔG değerleri EK I f de verilmiştir. Çatlak ilerlemesinin başladığı $N=5980$ çevrim ve $a_0=5.1$ mm iken ΔG değeri 65.59 J/mm^2 iken, kırılma anında 97.2 J/mm^2 ye kadar artış göstermiştir. Şekil 7.51 de 75° açılı çatlaklı numunede çatlak ilerleme hızı da/dN nin ΔG ile değişimi gösterilmiştir. 75° açılı çatlaklı numuneler için ΔG değerleri 0° açılı çatlaklı numunelere göre 95.1 %, 15° açılı çatlaklı numunelere göre 95.6 %, 30° açılı çatlaklı numunelere göre 95.3 %, 45° açılı çatlaklı numunelere göre 94.2 %, 60° açılı çatlaklı numunelere göre 88 % azalmıştır. Eğrinin eğimi yorulma deneyinin ilerleyen safhalarında azalmıştır. Bunun sebebi çatlak ilerleme hızının azalmasıdır. Çatlak ilerleme hızı ise plastik deformasyon bölgesinin artan çevrim sayısı ile büyümesi, fiberlerin çatlak ilerlemesini durdurucu yönde etkisi, çatlak ucundaki körlenme ve dallanma olaylarının görülmesidir.

7.18 75° çatlaklı numunelerde kompliyans yöntemiyle ΔG 'nin incelenmesi

Ortasında yatayla 75° açı yapan kalınlık yönünde boydan boya açılmış çatlak bulunan numunelere kompliyans yöntemi uygulanmıştır. Numunelere sabit gerilme oranında ($R=0.1$) yorulma deneyi uygulanmıştır. Her 500 çevrimde yorulma yükleri $P_{\max} = 2000$ N ve $P_{\min} = 200$ N karşılık gelen COD miktarları ve çatlak ilerleme miktarı ölçülmüştür. Şekil 7.52. de görüldüğü gibi P-COD grafiği çizilmiştir. Bu grafikte x eksenini ile 75° açı yapan çatlaklı numune için COD değerlerinin yorulma yükleri $P_{\max}$ ve $P_{\min}$ 'e göre değişimi gösterilmiştir. Ön yorulma çatlaklığı oluştuğunda yani $N=5980$ çevrimde $P_{\max}=2000$ N iken, $COD=0.015$ ve $P_{\min}=200$ N da, $COD=0.003$ mm olarak ölçülmüştür. Yorulma çevrim sayısı arttıkça çatlak ağzı açılma miktarı da artmıştır. Öyle ki stabil olmayan çatlak uzaması başladığında yani $N=13000$ çevrimde $P_{\max}=2000$ N iken, $COD= 0.61$ mm ve $P_{\min}=200$ N da $COD=0.44$ mm olmuştur. COD değerleri diğer bütün çatlaklı numunelere göre en küçük değerlerde ölçülmüştür. Yatayla 75° açı yapan çatlaklı numunede yorulma yükü çatlak düzlemine 75° eğik geldiği için çatlak ağzının açılması değerleri azalmıştır.



Şekil 7.52 75° çatlaklı numunenin P 'nin COD ile değişimi



Şekil 7.53 75° çatlaklı numunelerde C'nin a ile değişimi

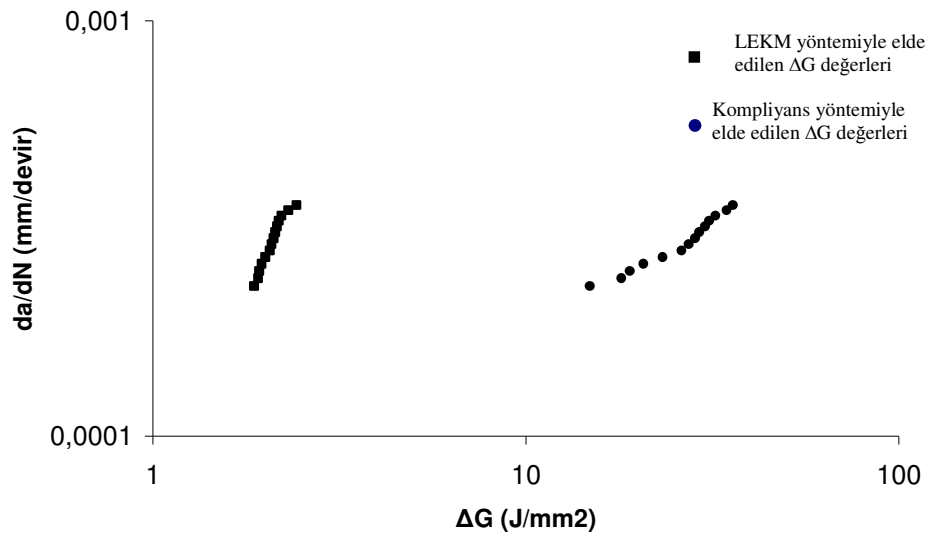
Hesaplanan C değerleri ve deney esnasında ölçülen çatlak ilerleme miktarı değerleri kullanılarak şekil 7.53 te görülen (C-a) grafiği çizilmiştir. Grafikten elde edilen eğriye Excel programı kullanılarak eğri uydurulmuş ve $C(a) = 1E-05x^2 + 3E-05x + 2E-05$ denklemi elde edilmiştir. Bu eğri denkleminin türevi alınarak dC/da değerleri hesaplanmış ve denklem (5.19) da yerine yazılarak ΔG değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 7.54 de yatayla 75° açı yapan çatlaklı numune için kompiyans yöntemi ve LEKM kullanılarak elde edilmiş $da/dN-\Delta G$ grafikleri görülmektedir. kompiyans yöntemi ile bulunan ΔG değerleri çatlak ilerlemesi başlangıcında $\Delta G = 14.8 \text{ J/mm}^2$ iken kararsız çatlak ilerlemesi başlangıcında ise $\Delta G = 35.9 \text{ J/mm}^2$ olarak bulunmuştur. ΔG değerleri çevrim sayısı ve çatlak ilerleme miktarı arttıkça artmıştır. Ayrıca ΔG değerleri 0° açılı çatlaklı numunelere göre 19 % artmış, 15° açılı çatlaklı numunelere göre 12 % azalmış, 30° açılı çatlaklı numunelere göre 51 % azalmış, 45° açılı çatlaklı numunelere göre 78 % azalmış, 60° açılı çatlaklı numunelere göre 80 % artmıştır. Ancak daha önceki çatlaklı numunelerde bulunduğu gibi ΔG eğrisinin eğimi azalmıştır. Çatlak uçlarındaki körlenme ve dallanma çatlakın ilerlemesini yavaşlatmış ve eğrinin eğiminin azalmasına neden olmuştur.

LEKM kullanılarak elde edilen ΔG değerleri eşitlik (5.22) kullanılarak hesaplanmıştır. Yine LEKM kullanılarak oluşturulmuş ve şekil 7.54 te verilen 45° çatlaklı numune için $da/dN-\Delta G$ grafiği incelenecek olursa, çatlak ilerlemesi

başlangıcında $\Delta G=1.86 \text{ J/mm}^2$ iken kararsız çatlak ilerlemesi başlangıcında ise $\Delta G=2.42 \text{ J/mm}^2$ olarak bulunmuştur.

Sonuç olarak farklı iki kırılma mekaniği yöntemi kullanılarak hesaplanan ΔG değerlerinde çatlak ilerlemesi başlangıcında 87.4 % uyumsuzluk hesaplanırken kararsız çatlak ilerlemesi başlangıcında 93.2 % olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi iki yöntem arasında büyük farklılıklar bulunmaktadır. Kompozit malzeme elastik-plastik davranış sergilediği için LEKM ΔG değerlerinin hesaplanmasında yetersiz kalmış ve iki yöntem ile bulunan değerler arasında farklılıklar oluşmuştur. Çünkü LEKM gevrek malzemelerde kırılma davranışını karakterize etmektedir. Ancak sünek kırılma sergileyen malzemelerde yetersiz kalmaktadır.



Şekil 7.60 75° çatlaklı numunelerde da/dN 'nın ΔG ile değişimi

7.55 75° Çatlaklı Numunelerde Hasar Mekanizması

Üzerinde x eksenine ile 75° açı yapan çatlaklı numunede çatlağın yatayla ile yaptığı açı söz konusu olduğu için açılma ve kayma modlarında (mod I ve mod II) hasar gerçekleşmiştir. Ancak kayma modunun etkisi artmıştır. Açılma modunun etkisinin azalması nedeni ile çatlak ilerleme hızı düşmüştür.

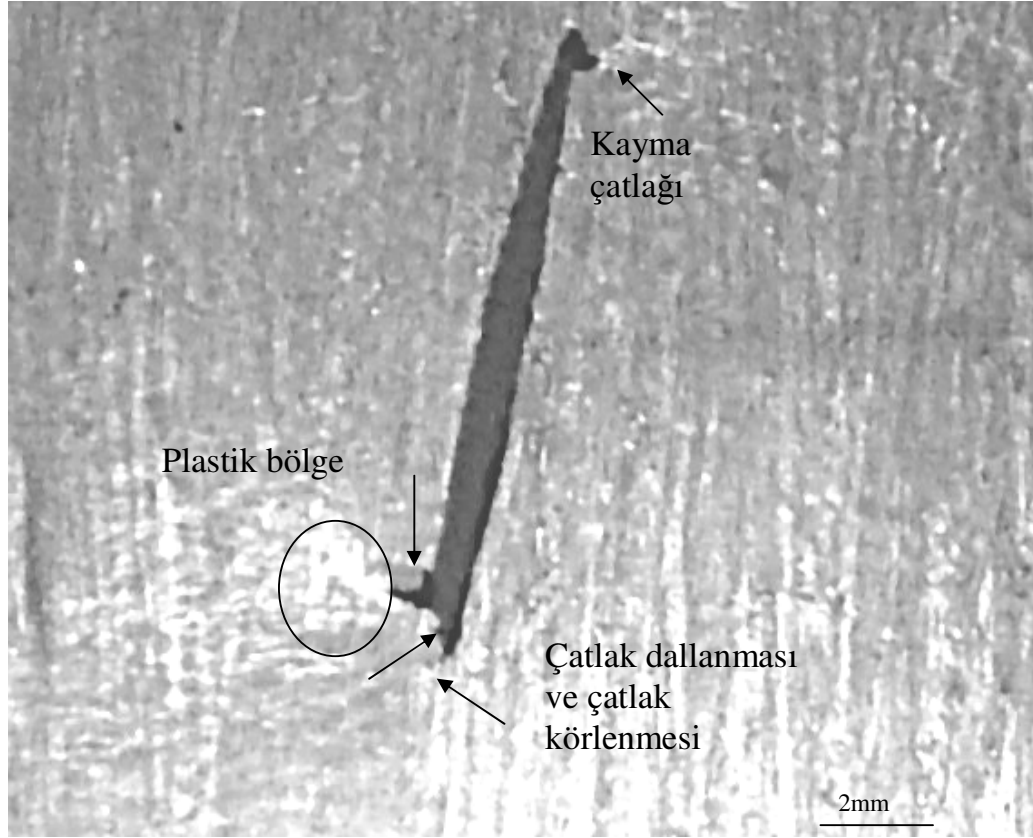
75° açılı çatlaklı numunede ön yorulma çatlağı N=5980 çevrimde 0.1 mm olarak ölçülmüş ve ardından yorulma deneyine geçilmiştir. Yorulma ön çatlağı açana kadar geçen çevrim sayısında çatlak ağzı açılma miktarı $\Delta COD=0.08$ mm olarak ölçülmüştür.

Yorulma deneyinde çevrim sayısı arttıkça çatlak ilerlemeden önce çatlak uçlarında beyaz bölge oluşmuş ve bu beyaz bölge büyümüştür. Bu bölge matristeki çekme gerilme yoğunlaşmasının görüldüğü bölgedir. Bu bölgede artan gerilme yoğunluğu matrisi elastik davranıştan plastik davranışa sokmuştur. Matrisin plastik olarak şekil değiştirdiği bu bölgeden çatlak ilerleyerek fibere ulaşmıştır. Çatlak ilerlemesi başlangıç çatlak düzlemine 75° açı yapacak şekilde kink yaparak ilerlemiştir.

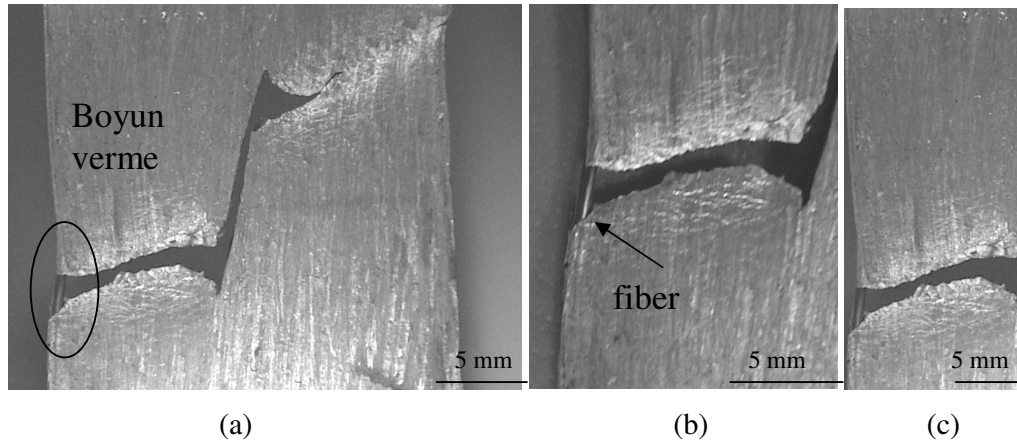
Kayma modunun kırılma üzerine etkisi arttığı için çevrim sayısı ilerledikçe numune çarpılmıştır. Çarpılmanın da etkisi ile çatlak ucunda ilerleme yavaşlamış, şekil 7.55 de görüldüğü gibi çatlak ucu körlenmesi ve çatlak dallanması ortaya çıkmıştır. Çatlak uçlarındaki körlenme ve dallanma kayma moduna, matrisin plastik şekil değişimine bağlı olarak ortaya çıkmıştır. Çatlağın dallanması sebebi ile ortaya çıkan küçük çatlaklar çatlak ilerlemesinin yavaşlatmış ve bu çatlaklar ilerleyebilmek için daha fazla enerjiye ihtiyaç duymuşlardır. x eksenine ile 75° açı yapan çatlaklı numunede kayma modunun etkisi çok belirgindir. Çatlak ilerlemesi makine ile açılan çatlak ucundan değil daha aşağıda bir bölgede kayma modu etkisi ile oluşan çatlaktan devam etmiştir. Numunenin kırılmasının sebebi de kayma modu etkisi ile oluşan çatlaktır. Şekil 7.55 da çatlak ucunun körelmesi ve dallanması gösterilmiştir. Şekilden görülmektedir ki makine ile açılan çatlağın ucundaki plastik bölge kayma modunun etkisi ile oluşan diğer çatlağa göre çok daha küçüktür. Bu da kırılmanın ana çatlağın kayma modu ile oluşan çatlak olduğunu ortaya koymaktadır.

Çatlağın fiberi aşma mekanizması daha önceki çatlaklı numunelerde olduğu gibi ortaya çıkmıştır. Çatlak önündeki fiberi kesmeden aşmıştır. Çatlak ilerlemesi hem ana çatlaktan hem çatlak dallanması ile oluşan küçük çatlardan devam etmiştir. Çatlağın fiber kesmeden aşması fiber-matris arayüzey ayrılmasının kanıtıdır. Yani çatlağın önündeki matriste oluşan çekme gerilme yoğunluğu matris tarafından fiberlere aktarılmış ve fiberlerde çekme gerilmeleri oluşurken fiber-matris arayüzeyinde kayma gerilmeleri meydana gelmiştir. Artan çevrim sayısı ile arayüzeydeki kayma gerilme yoğunluğu da artmış ve bu gerilme yoğunluğu arayüzey dayanımına ulaştığında fiber-matris ayrılması gerçekleşmiştir. Böylece çatlak fiberi kesmeden arayüzeyden ilerleyerek fiberi aşmıştır. Kırılma yüzeyi incelendiğinde fiber matris ayrılması sonucu sıyrılmış fiberler görülmüştür. Çatlak ilerleme düzlemi doğrultusunda matrisin dış kenarlarında genişlik yönünde daralma yani boyun verme gerçekleşmiştir. Şekil 7.56 (a) da bu durum açıkça görülmektedir. Numunenin boyun vermesi deney esnasında numunenin plastik olarak uzamadığının ve sünek davranış gösterdiğinin kanıtıdır.

Çatlak ilerleme miktarı $\Delta a = 1.56$ mm ye ulaştığında fiberler birkaç saniye içinde kopmuş ve çatlak kararsız ilerleme bölgesine girmiştir. Bu andan itibaren numune kırılmıştır.



Şekil 7.55 75° çatlaklı kompozit malzemede çatlak ilerlemesi



Şekil 7.56 Kırılma sonrası 75° çatlak geometrisine sahip numunenin resimleri

- a-) Kırılma sonrası malzeme hasar resmi
- b-) Malzemenin kenar uç kısımlarında matris yırtılması
- c-) Çatlağın ilerlediği kısımlar

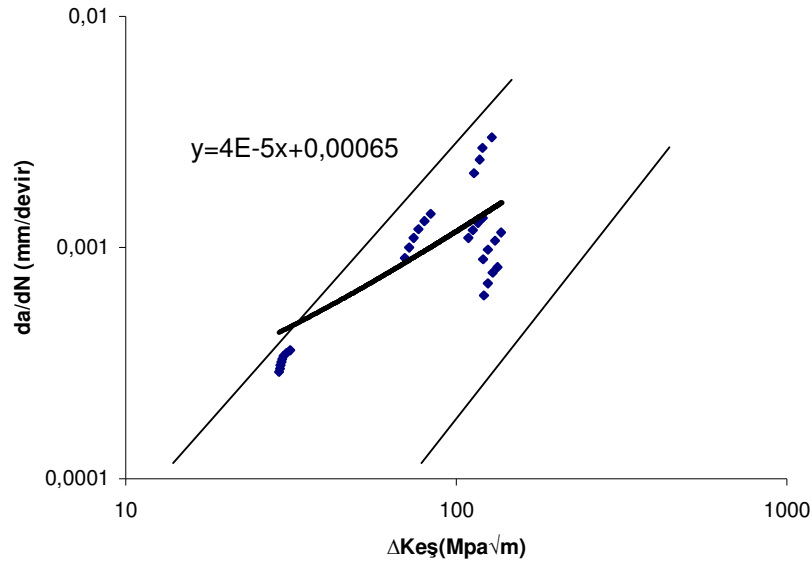
7.20 Tüm Çatlaklı Numunelerin Grafiklerinin Kıyaslanması

Burada 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° çatlaklı numunelere ait $da/dN \sim \Delta K$ ve $da/dN \sim \Delta G$ grafiklerinin kıyaslanması ve Paris-Erdoğan eşitliği kullanılarak malzeme sabitlerinin bulunması amacıyla $da/dN \sim \Delta K_{eş}$, ve $da/dN \sim \Delta G$ grafikleri gösterilmiştir.

7.20.1 Tüm çatlak açılarında LEKM göre bulunan ($da/dN \sim \Delta K_{eş}$) grafikleri'nin kıyaslanması

x eksenini ile 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° açı yapan çatlaklı numunelere ait $da/dN \sim \Delta K_{eş}$ grafikleri şekil 7.57 de gösterilmiştir. Şekiller incelenecek olursa 0° de $\Delta K_{eş}$ değerlerinin en büyük eğime sahip olduğu yani çatlak ilerleme hızının en yüksek numune olduğu, çatlak açılarının artmasıyla, eğimlerin dolayısı ile çatlak ilerleme hızının sırasıyla azaldığı açıkça görülmektedir. Sonuç olarak çatlak oryantasyon açılarının değişimi ile çatlak ilerleme hızı azalırken yorulma ömrü artmakta ve buna paralel olarak da $\Delta K_{eş}$ değerleri de azalmaktadır. Yine $\Delta K_{eş}$ değerleri 30° 'ye kadar artmış daha sonra çatlak oryantasyon açılarının artmasıyla azalmıştır.

Ayrıca $da/dN \sim \Delta K_{eş}$ grafikleri, eşit yönlü iki doğru çizilerek bant içerisine alınmıştır. Bu doğruların denklemi Excel programı yardımı ile eğri uydurularak elde edilmiş ve logaitmik ekseninde $y = 4E-5x + 0,00065$ olarak bulunmuştur. Bu denklem eşitlik (4.5) de verilen ($da/dN = A(\Delta K)^n$) Paris-Erdoğan eşitliğinin logaritmik ifadesine denktir. Buradan; malzeme sabitleri olan $A = 1.001$ ve $n = 0.00004$ olarak elde edilmiştir.

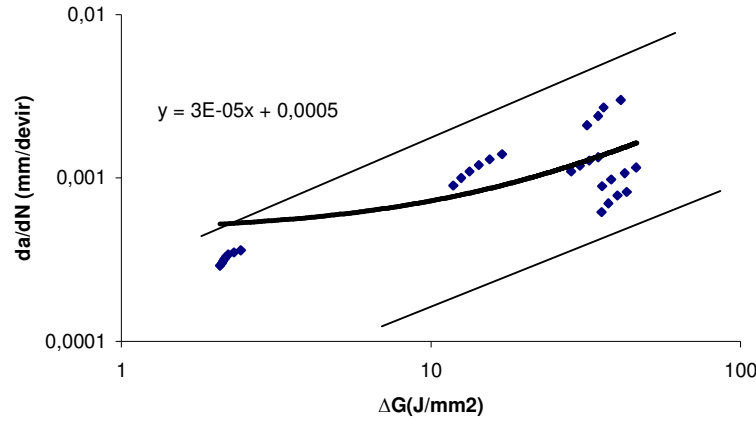


Şekil 7.57 0°, 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° çatlaklı numunelerde da/dN 'nin $\Delta K_{eş}$ değişimi

7.20.2 Tüm çatlak açılarında LEKM göre bulunan ($da/dN \sim \Delta G$) grafikleri'nin kıyaslanması

Burada tüm geometrilere ait $da/dN \sim \Delta G$ grafikleri şekil 7.58 de gösterilmiştir. Şekiller incelenecek olursa 0° de ΔG değerlerinin en büyük eğime sahip olduğu, çatlak açılarını artmasıyla, eğimlerin de sırasıyla azaldığı açıkça görülmektedir. Sonuç olarak çatlak açılarının değişimi ile çatlak ilerleme hızı azalırken yorulma ömrü artmaktadır. ΔG değerleri de 30° çatlak açılarına kadar artmakta, 45°, 60° ve 75° ler de azalmaktadır.

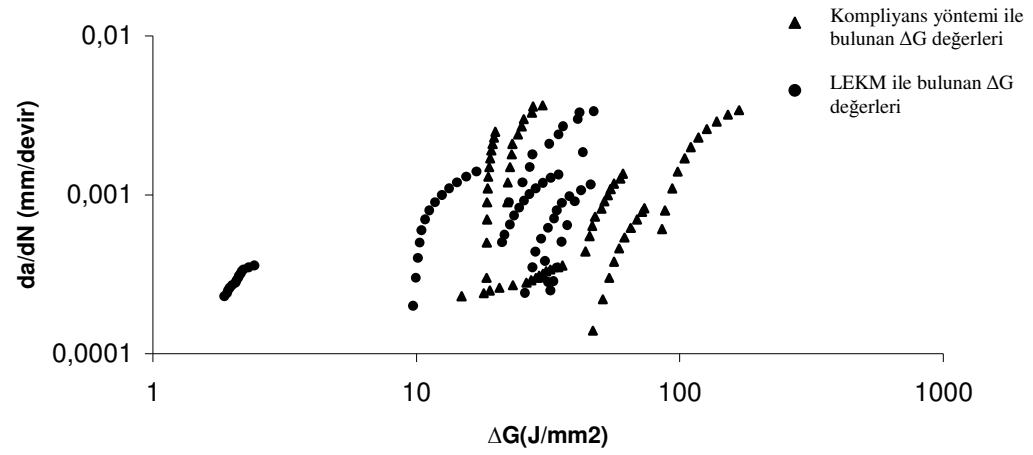
Ayrıca $da/dN \sim \Delta G$ grafikleri, eşit yönlü iki doğru çizilerek bant içerisine alınmıştır. Bu doğruların denklemi Excel programı yardımı ile eğri uydurularak elde edilmiş ve logaitmik ekseninde $y = 3E-05x + 0,0005$ olarak bulunmuştur ve eşitlik (4.6) da verilen ($da/dN = B(\Delta G)^m$) Paris-Erdoğan eşitliğinin logaritmik ifadesine denktir. denktir. Buradan; malzeme sabitleri olan $B=1.001$ ve $m=3E-05$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 7.58 0°, 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° çatlaklı numunelerde da/dN'nın ΔG değişimi

7.20.3 Tüm çatlak açılarında LEKM ve kompiyans yöntemine göre bulunan (da/dN~ΔG) grafikleri'nin kıyaslanması

Şekil 7.59 da yatayla 0°, 15°, 30°, 45°, 60° ve 75 ° açısı yapan çatlaklı numunelerin LEKM ve Kompiyans yöntemi ile bulunan ΔG değerleri aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. Görüldüğü gibi yatayla 0° açısı yapan çatlaklı numune hariç diğer çatlaklı numunelerde Kompiyans yöntemi ile hesaplanan ΔG değerleri LEKM ile hesaplanan ΔG değerlerine göre daha büyük çıkmıştır. Kompiyans yöntemi EPKM de kırılma davranışı için kullanılan bir yöntemdir. Bu nedenle çatlak ucunda meydana gelen plastik davranış değişikliklerinin kırılma davranışı üzerine etkisini kapsamaktadır. Çatlak ucunda görülen elasto-plastik davranış çatlak ilerleme hızını azaltmaktadır. Bu nedenle çatlaklı numunelerde çatlak ilerleyebilmesi için daha fazla enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle kompiyans yöntemi ile bulunan ΔG değerleri sadece gevrek davranış için ortaya konulan LEKM ile hesaplanan ΔG değerlerinden büyük çıkmıştır.



Şekil 7.59 0°, 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° çatlaklı numunelerde LEKM ve Kompiyans Yöntemi ile elde edilen da/dN 'nın ΔG değişimi

8.SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yatayla 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° açı yapan merkez çatlakları açılmış middle tension (MT) tek yönlü paslanmaz çelik tel takviyeli alüminyum bir levhanın kompozit malzemelerin yorulma yükü altında kırılma davranışları incelenmiştir. Önce malzemenin mekanik özellikleri belirlenmiş daha sonra 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° açılarda merkez çatlakları açılmıştır. Her bir açılı çatlaklı numuneler için yorulma deneyleri yapılmış ve kırılma davranışları incelenmiştir. Yorulma deneyleri ASTM E 647 standartlarına göre , $f=0.65$ Hz' lik bir frekans ve gerilme oranı $R=0.1$ şartlarında yapılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıya çıkarılmıştır.

- 1- Kırılma anındaki yorulma çevrim sayısı yatayla 0° , 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° lik açı yapan numunelerde, aynı sırayla giderek artmıştır. Beklenildiği gibi en düşük çevrim sayısı 0° de ki numunede olurken, en yüksek çevrim sayısı da 75° de ki numunede gerçekleşmiştir.
- 2- Yorulma çevrim sayıları arttıkça genel olarak her numunede çatlak ilk olarak çatlak uçlarında beyazlaşma görülmüştür. Ayrıca çatlak ilerleme doğrultusunda matris kalınlık yönünde azalmalar meydana gelmiştir. Numunenin boyca uzamasından dolayı çatlak ilerleme doğrultularında enine daralmalar gözlenmiştir.
- 3- Genel olarak çatlak ilerleme miktarı “a” arttıkça, çatlak ilerleme hızı da (da/dN) artmaktadır. Ancak hız değişimindeki artış çatlak oryantasyon açısının artmasıyla azalmaktadır.
- 4- 0° de ki çatlaklı numunelerde uygulanan yük çatlaka dik olduğundan sadece açılma modundan dolayı hasar oluşmuş, 15° , 30° , 45° , 60° ve 75° lik açı yapan numunelerde açılarda ise açılma ve kayma modlarında gerçekleşmiştir. Ayrıca 0° açılı çatlaklı numune hariç diğer çatlak oryantasyon açıları, çatlak ilerlemesi, yatay da devam ederek kink olayı meydana gelmiştir.

- 5- Kompliyanans yöntemi ve ΔK 'nın kullanılmasıyla yapılan hesaplamalardan oluşturulan $da/dN-\Delta G$ grafiklerindeki eğimlerde çatlak açısının artması ile uyumsuzluğun arttığı belirlenmiştir.
- 6- Kompozit malzemenin kendisini oluşturan malzemelere göre mekanik özellikleri geliştirilmiştir. Bu sebeple üretilen kompozit malzeme özellikle havacılık ve uzay uygulamalarında, otomotiv sanayinde , yüksek sıcaklık uygulamalarında, korozif ortamlarda kullanılabilir.

Mevcut çalışmaya ilave olarak, farklı sıcaklık-basınç-zaman parametreleri kullanılarak üretilmiş aynı tür kompozit malzemenin yorulma ömrü veya ısıt işlemler uygulanmış numunelerin yorulma ömrü ve mikro yapı değişimleri incelenebilir. Ayrıca farklı gerilme oranlarında ve frekanslarda yorulma deneyleri yapılabilir ve yapılan deneyler sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan analitik modeller ile karşılaştırılabilir.

9. KAYNAKLAR

- Agrawal, P., Sun, C., T., 2004, Fracture in Metal-Ceramic Composites, Composite Science and Technology, vol. 64, p. 55-64.
- Akdemir, A., Tarakçıoğlu, N., Avcı, A., 2001, Stress Corrosion Crack Growth in Glass/Polyester Composites with Surface Crack, Composites Part B vol. 32, p. 123–129.**
- Andrianopoulos, N., P., Kourkoulis, K., Saragas, S., 1997, COD Measurements and Optimum Exploitation of Metal Matrix Composites for Aerospace Applications, Engineering Fracture Mechanics, vol. 57, p. 565-576
- Archangelska, I., N., Mileiko, S., T., 1976, Fracture Mechanics of Metal Matrix-Metal Fibre Composites, J. Materials Science, vol. 11, p. 356-362
- Arıkan, H., 2002, Çelik Tel Takviyeli Polimer Kompozitlerin Kırılma Davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bil.Ens., Konya.
- ASTM E 647, 2000, The Middle Tension Specimens, p. 616-619.
- Banks-Sills, L., Boniface, V., Eliasi, R., 2005, Development of a Methodology for Determination of Interface Fracture Toughness of Laminate Composite-The 0°/90° Pair, Int. J. of Solids and Structures, vol.42, p. 663-680
- Banks-Sills, L., Leiderman, V., 1999, Macro-mechanical Material Model for Fiber Reinforced Metal Matrix Composites, Composites Part B, vol. 30, p. 443-452

- Baron, R., P., Wert, J., A., Gerard, D., A., Wawner, F., 1997, E., , Fracture Mechanics of Metal Matrix- Metal Fibre Composites, Journal of Material Science, vol 32, p. 6435-6445
- Beaumont, W. R., Schults, M., Friedrich, K., 1990, Failure Analysis of Composite Materials, Technomic Publishing Co.
- Bocanegra-Bernal, M., H., 2004, Hot Isostatic Pressing (HIP) Technology and Its Applications to Metals and Ceramics, J. Materials Science, vol. 39, p. 6399-6420
- Bloyer, D., R., Vankateswara, R., Ritche, R., O., 1999, Fatigue Crack Propagation Behaviour of Ductile/Brittle Laminated Composites, Metalurgical ve Materials Transections, vol. 3, p. 633
- Borrego, L.,P., Costa, J., M., Ferreira, J., M., 2005, Fatigue Crack Growth in Thin Aluminum Sheets under Loading Sequences with Priodic overloads, Thin-Walled Structures, vol. 43, p. 772-788
- Cao, G., H., Liu, Z., G., Liu, J., M., Shen G., J., Wu, S., Q., 2001, Interface Investigations of Alumina and Aluminosilicate Short-Fiber Reinforced, Aluminum Alloy Composites, vol. 61, p. 545-550
- Ceschini, L., Minak, G., Morri A., 2005, Tensile and Fatigue Properties of The AA6061/20 vol.% Al_2O_{3P} and AA7005/10 vol.% Al_2O_{3P} Composites, Composite Science and Technology, vol. X, p. X-X
- Chang, S., Lin, S., 1997, Processing Stainless Steel Fibre Reinforced NiAl Matrix Composites by Reaktive Hot Pressing, J. Materials Science, vol.32, p. 5127-5135

- Chen, L., Lin, S., Chang, S., 2005, Tensile Properties and Thermal Expansion Behaviors of Continuous Molybdenum Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Composite Science and Technology*, vol X, p. X-X
- Chen, W., Y., C., Winchel, P., G., 1977, *Scripta Materialia*, vol 11, p. 289-295
- Chiang, C., R., 2000, Prediction of The Fracture Toughness of Fibrous Composites, *J. Materials Science*, vol 35, p. 3161-3166
- Christensen, R., M., 1996, Stress Based Yield/Failure Criteria for Fiber Composites, vol. 34, p. 529-543
- Chung, D., S., Enoki, M., Kishi, T., 2002, Science and Technology of Advanced Materials, vol 3, p. 129-135
- 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.
- Devranjsih, R., 1997, Development of a New Fatigue Damage Growth Model for Polymer Matrix Composites, Ph.D. Thesis, University of Wayne State.
- Ding, H., Z., Biermann, H., Hartmann, O., 2002, A Low Cycle Fatigue Model of A Short Fiber Reinforced 6061 Aluminum Alloy Metal Matrix Composite, *Composite Science and Technology*, vol 62, p. 2189-2199
- Echaabi, J., Trochu, F., Gauvin, R., 1996, Review of Failure Criteria of Fibrous Composite Materials, *Polymer Composite*, vol. 17, no. 6
- Erdoğan, F., 2000, Fracture Mechanics, *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 37, p. 171-183

- Fatemi, A., Plaseied, A., Khosrovaneh, A., K., Tanner, D., 2005, Application of Bi-linear Log-Log Model to Strain Controlled Fatigue Data of Aluminum Alloys and Its Effect of Life Predictions, *Int. Journal of Fatigue*, vol 27, p. 1040-1050
- 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.
- 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,
- Filho, A., L., Atkinson, H., Jones, H., Rios, E., King, S., 1998, Hot Isostatic Pressing of Metal Reinforced Metal Matrix Composites, vol.33, p. 5517-5533
- Ganesh, V., V., Lee, C., K., Gupta, M., 2002, Enhancing The Tensile Modulus and Strength of Aluminum Alloy Using Interconnecting Reinforcement Technology, *Materials Science and Engineering, A* 333, p. 193-198
- Gasquerés, C., Sarrazin-Baudoux, C., Petit, J., Dumont, David, 2005, Fatigue Crack Propagation in Aluminum Alloy at 223 K, *Scripta Materialia*, vol. 53, p.1333-1337
- Grishaber, R., B., Sergueva, A., V., Mishra, R., S., Mukherjee, A., K., 2005, Laminated Metal Composites-High Temperature Deformation Behaviour, *Metarial Science and Engineering, A* 403, p. 17-24
- Guo, S., Kagawa, Y., 2001, Fatigue Behaviour of Duplex Metal Coated SiC Fibre Reinforced Ti-15-3 Matrix Composites, *Material Science and Technology*, vol 17, p 1107

- Guo, Y., J., Wu, X., R., 1999, Bridging Stress Distribution in Center Cracked Fiber Reinforced Metal Laminates: Modeling and Experiment, vol. 63, p. 147-163
- Han, L., H., Li, L., Sun, J., 2005, Ductile–Brittle Transition of Pure Al-Interlayer Sandwiched by High Strength Al Alloy, Materials Science and Technology, A 403, p. 165-173
- Homan, J., J., 2006, Fatigue Initiation in Fibre Metal Laminates, Int. J. Fatigue, Vol.28, p. 366-374
- Hwang, Y.; Horng, C.; Lin, S.; Liu, K.; Jahn, M., 1997, Interface Study for Stainless Steel Fibre-Reinforced Aluminium Matrix Composite, Journal of Materials Science, Vol. 32, p 719-725
- Jacquesson, M., Girard, A., Vidal-Setif, H., Valle, R., 2004, Tensile and Fatigue Behaviour of Al- Based Metal Matrix Composites Reinforced with Continuous Carbon or Alumina Fibers: Part I. Quasi-Unidirectional Composites, Proquest Science Journals, A35, p.3289
- Jeong, D., Y., 2004, Mixed Mode Fatigue Crack Growth in Test Coupons Made from 2024-T3 aluminum, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 42, p. 35-42
- Irwin, G.R., 1957, Analysis of Stress and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate, Journal of Applied Mechanics. vol. 24, p. 651-654.
- Kang, G., Yang, C., Zhang, J., 2002, Tensile Properties of Randomly Oriented Short δ - Al_2O_3 Fiber Reinforced Aluminum Alloy Composites. I. Microstructure Characteristics, Fracture Mechanisms and Strength Prediction, Composites Part A, vol 33, p. 647-656

- Kermanidis, A., T., Petroyiannis, P., V., Pentelakis, S., G., 2005, Fatigue and Tolerance Behaviour of Corroded 2024 T351 Aircraft Alloy, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol. 43, p. 121-132
- Khalili, S., M., R., Mittal, R., K., Kalibar, S., G., 2005, A Study of The Mechanical Properties of Steel/Aluminium/GRP Laminates, Materials Science and Engineering, A412, p. 137-140
- Kim, B. W., Mayer, A. H., 2003, Influence of fiber direction and mixed-mode ratio on delamination fracture toughness of carbon/epoxy laminates, Composites Science and Technology vol.63 p. 695–713
- 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.
- Kumar, P., Reddy, R., 1997, Experimental Determination of Interlaminar G_{IC} Using a Fully Embedded Center Cracked Specimen, Eng. Fracture Mechanics, vol. 59, p. 183-189
- Lawcock, G., D., Ye, L., Y., Mai, Y., W., Fatigue Crack Propagation in Fiber Reinforced Metal Laminates with treated or untreated carbon fibers, J. Materials Science Letters, 1999, vol. 18, p307-308
- Lee, C., S., Chandel, R., S., 1999, Vacuum-Free Diffusion Bonding of Aluminium Metal Matrix Composite, J. Materials Processing Technology, vol 90, p. 326-330
- Li, J., 2000, Debonding of The Interface as ‘Crack Arrestor’, Int. J. Of Fracture, vol. 105, p. 57-79

- Liu, H., Y., Zhang, X., Mai, Y., M., Diao, X., X., 1999, On Steady State Fibre Pull-out I The Stres Field, Composite Science and Technology, vol. 59, p. 2179-2189
- Liu, H., Y., Zhang, X., Mai, Y., M., Diao, X., X., 1999, On Steady State Fibre Pull-out II Computer Simulation, Composite Science and Technology, vol. 59, p. 2191-2199
- Long, X., Cai, G., Svensson, L., 1999, Investigation of fracture and Determination of Fracture Toughness of Modified 9Cr-1Mo Steel Weld Metals Using AE Technique, Material Science and Engineering, A 270, p.260-266
- Luyendijk, T.; Nieswaag, H., 1981, Crack Opening Displacement and Fatigue Crack Growth Measurements in Commercial Ductile Iron, International Cast Metals Journal, vol. 6, p. 18-27
- Ma, Q., Yang, Y., Kang, M., Xue, Q., 2001, Microstructures and Mechanical Properties of Hot Pressed MoSi₂-Matrix Composites Reinforced with SiC and ZrO₂ Particles, Composite Science and Technology, vol. 61, p. 963-969
- Machida, K., 1997, J_{IC} Evaluation and Effective Thickness of Thin Specimens with and without Side-grooves, Int. J. Pres. Ves. & Piping, vol 71, p. 181-188
- Mackerle, J., 2002, Metal Matrix Composites: Finite Element and Boundry Element Analyses, Finite Elements in Analysis and Design, vol. 38, p.659-667
- Mekky, W., Nicholson, P., S., 2006, The Fracture Toughness of Ni/Al₂O₃ Laminates by Digital Image Correlation II: Bridging-Stresses and R-Curve Models, Engineering Fracture Mechanics, vol 73, p. 583-592

- Moser B., Weber, L., Mortensen, A., 2005, Damage Accumulation During Cycling Loading of a Continuous Alumina Fibre Reinforced Aluminum Composite, *Scripta Materialia*, vol. 53, p. 1111-1115
- Nakai, M., Eto, T., 2000, New Aspects of Development of High Strength Aluminum Alloys for Aerospace Applications, *Material Science and Engineering, A* 285, p. 62-68
- Nalla, R.K., Campell, J.P., Ritchie, R.O., 2002, Mixed-Mode High Cycle Fatigue Crack Growth Thresholds in Ti-6Al-4V Role of Small Cracks, *International Journal of Fatigue*, vol. 24, p. 1047-1062.
- Newman, J.C., Raju, I.S., 1979, Analysis of Surface Cracks in Finite Plates Under Tension or Bending Loads, NASA TP 1578.
- Newman, J., C., Haines, M., J., 2005, Verification of Stress-Intensity Factors for Various Middle-Crack Tension Test Specimens, *Engineering Fracture Mechanics*, vol 72, p. 1113-1118
- Oguni, K., Ravichandran, G., 2001, A Micromechanical Failure Model for Unidirectional Fiber Reinforced Composites, *Int. J. Solids and Structures*, vol.38, p.7215-7233
- Pal, T. K., 2005, Joining of Aluminum Metal Matrix Composites, *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 20, p. 717-726
- Paris, P.C., Sih, G.C.M., 1965, Stress Analysis of Cracks, *Symposium on Fracture Toughness and its Applications*, ASTM STP 381, p. 30-83.
- Peng, H., X., Fan, Z., Mudher, S. D., Microstructures and Mechanical Properties of Engineered Short Fibre Reinforced Aluminum Matrix Composites, *Materials Science and Engineering, A* 335, p. 207-216

- Pook, L.P., 1971, The Effect of Crack Angle on Fracture Toughness, Engineering Fracture Mechanics, vol 3, p. 205-218.
- Poursartip, A., Gambone, A., Ferguson, S., Fernlund, G., 1998, In-situ SEM Measurements of Crack Tip Displacements in Composite Laminates to Determine Local G in Mode I and II, Engineering Fracture Mechanics, vol 60, p. 173-185
- Potti, P., K., G., Rao, B., N., Srivastava, V., K., 2000, Notched Tensile Strength of Various Fibre Reinforced Metal Laminates, Adv. Composite Materials, vol 9, p. 187-206
- Quan, G., 1999, Mechanical Behaviour and Microstructure of NiAl Short Fiber Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites, Scripta :Materialia, p. 779-783
- Ramakrishnan, P., 1984, Hot-Pressed Stainless Steel Fibre-Reinforced Aluminum Composites, Materials Science Monographs, Conference article (CA), Sintered Metal-Ceramic Composites, Proceedings of the Third International School
- Ramamurty, U., 2005, Assesment of Load Transfer Characteristics of a Fiber Reinforced Titanium Matrix Composite, vol. 65, p. 1815-1825
- Ramamurty, U., 1999, Fatigue in Selectively Fiber Reinforced Titanium Matrix Composites, Metalurgical and Materials Transactions, vol. 8, p.2237
- Rikards, R., Bulchholz, F.,G., Wang, H., Bledzki, A., K., Korjakin, A., Richard, H., A., Investigation of Mixed Mode I/II Interlaminar Fracture Toughness ,of Laminated Composites by Using CTS Type Specimen, Engineering Fracture Mechanics, vol. 61, p.325,342

- Samancı, A., 2004, Yüzey Çatlaklı Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Etkisi Altında Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bil.Ens., Konya.
- Sarkisyan, N., S., Kiiko, V., M., Khvostunkov, A., A., Mileiko, S., T., 1998, A Study of Structure Formation and Failure of Short Fibre Composites with Metal and Ceramic Matrices, *Applied Composite Materials*, vol. 5, p.305-317
- Sayman, O., Esendemir, Ü., 2002, An Elastic-Plastic Stress Analysis of Simply Supported Metal-Matrix Composites under A Transverse Uniformly Distributed Load, *Composite Science and Technology*, vol. 62, p. 265-273
- Sayman, O., 2001, An Elastic-Plastic Thermal Stress Analysis of Aluminum Metal-Matrix Composites, *Composite Structures*, vol. 53, p. 429-425
- Sayman, O., Akbulut, H., Meriç, C., 2000, Elasto-Plastic Stress Analysis of Aluminum Metal Matrix Composites Under In-plane Loading, *Composites and Structures*, vol. 75, p. 55-63
- Shan, Y., Kin, L., 2002, Environmental Fatigue Behavior and Life Prediction of Unidirectional Glass–Carbon/Epoxy Hybrid Composites, *International Journal of Fatigue*, vol 24, p. 847–859.
- Shibuya, Y., Fujimoto, S., Aoki, D, Sato, M., Shirahata, H., Fukunaga, H., Sekine, H., 2001, Evolution of Crack Growth in Aluminum Panels Repaired with Bonded Composite Patch, *Adv. Composite Materials*, vol 10, p. 287-297
- Shivakumar, K., Chen, H., Abali, F., Le, D., Davis, C., 2006, A Total Fatigue Life Model For Mode I Delaminated Composite Laminates, *Int. J. Fatigue*, vol 28, p. 33-42

- Soden, P., D., Hinton, M., J., Kaddour, A., S., 1998, A Comparison of The Predictive Capabilities of Current Failure Theories for Composite Materials, Composite Science and Technology, vol. 58, p. 1225-1254
- Sokolov, M., A., Robertson, J., P., Snead, L., L., Alexander, D., J., Ferguson, P., James, M., R., Maloy, S., A., Sommer, W., Willcutt, G., Louthan, M., R., 2002, Fracture Toughness Cracterization of 304L and 316L Austenitic Stainless Steels and Alloy 718 after Irradition in High Energy, Mixed Proton/Neutron Spectrum, Effects of Radiation on Materials: 20th Int. Symposium
- Souma, V., E., 2000, Fracture Mechanics, Lecture Notes, Dept. Of Civil Enviromental and Architectural Eng. Universty of Colorado, Boulder
- Srivastan, T., S., Soboyejo, W., O., Lederich, L., J., 1997, Tensile Deformation and Fracture Behaviour of Titanium Alloy Metal Matrix Composite, Composites Part A, A 28A, p. 365-376
- Stevanovic, D., Jar, B., Lowe, A, Kalyanasandaram, S., 2000, On Crack Initiations Conditions for Mode I and Mode II Delemination Testing of Composite Materials, Composites Science and Technology. vol. 60, p. 1879-1887.
- Sun, W., 1997, Effect of an Interlaminar Adhesive on the Yielding Behaviour of Al/fiber Reinforced Thermoplastic Composite Laminates, Journal of Thermoplastic Composite Materials, vol. 10.
- Şahin, Y., 2000, Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara.
- Taha, M., 2001, Industrialization of Cast Aluminum Composites, Materials an Manufacturing Processes, vol. 16, p. 619-641

- Tamayo, P., 1977, Stress-Strain Behaviour Of Aluminium Reinforced With Stainless Steel Fibres, *Aluminium*, vol. 53, p 310-313
- Tong, J., 2002, Characteristics of Fatigue Crack Growth in GFRP Laminates, *International Journal of Fatigue*, vol. 24, p. 291–297.
- Travessa, D., Ferrante, M., Ouden, G., 2002, Diffusion Bonding of Aluminum Oxide to Stainless Steel Using Stress Relief Layers, *Material Science and Engineering, A* 337, p.287-296
- Vassel, A., 1999, Continuous Fibre Reinforced Titanium and Aluminum Composites: A Comparison, *Materials Science and Engineering, A* 263, p. 305-313
- Wang, Q., Y., Kawagoishi, N., Chen Q., 2006, Fatigue and Fracture Behaviour of Structural Al-Alloys up to very Long Life Regimes, *Int. J. Fatigue*, vol. X, p.X
- Wu, X., Bowen, P., 2000, Fatigue Crack Growth Resistance of Unidirectional Fiber Reinforced Titanium Metal Matrix Composites under Transverse Loading, *Metalurgical and Materials Transactions*, vol. 8, p.2083
- Xia, X., McQuen, H., J., Zhu, H., 2002, Fracture Behaviour of Particle Reinforced Metal Matrix Composites, *Applied Composite Materials*, vol. 9, p. 17-31
- Xu, D., Schmauder, S., Soppa, E., 1999, Influence of The Geometry Factors on The Mechanical Behaviour Particle and Fiber Reinforced Composites, *Computational Materials Science*, vol. 15, p. 295-301
- Xun, Y., W., Tan, M., J., Zhou, J., T., 2000, Processing and Interface Stability of SiC Fiber Reinforced Ti-15V-3Cr Matrix Composites, *J. Materials Processing Technology*, vol. 102, p. 215-220

- Yan Xiangiao, 2005, Stress Intensives and Propagation of Mixed Mode Cracks, Engineering Failure Analysis. vol.XX, p. XX.
- Yang, L., Hosoda, N., Suga, T., 1997, Investigations on The Interface Microstructure of Stainless Steel /Aluminum Joints Created by the Surface Activated Bonding Method, Interface Science, vol. 5, p. 279-286
- Yang, Q., Qin, Q., 2001, Fiber Interactions and Effective Elasto-Plastic Properties of Short Fiber Reinforced Composites, Composite Structures, vol 54, p 523-528
- Zhang. X., Liu H. Y., Mai Y. W., 2004, Effects of fibre debonding and sliding on the fracture behaviour of fibre-reinforced composites, Composites: Part A vol.35 p.1313–1323
- Zhou, Y., Huang, W., Xia Y., 2002, A microscopic dynamic Monte Carlo simulation for unidirectional fiber reinforced metal matrix composites, Composites Science and Technology , vol.62, p. 1–12
- Zuo, K., H., Jiang, D., L., Lin, Q., L., 2006, Mechanical Properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ Laminated Composites, Materials Letters, vol. 60, p.1265-1268

10. EKLER

EK I a 0° ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa $\sqrt{m}$)	ΔG (J/mm ²)	COD (mm)	C (mm/N)	dc/da (1/N)	Komlians yöntemiyle bulunan ΔG (J/mm ²)
250	0	0,0003	94,87115203	21,43144	0,163	2,33333E-05	0,000041	22,14
500	0,113	0,0009	95,93733695	22,50134	0,286	3,38889E-05	4,12E-05	22,22708
750	0,619	0,0012	100,5731575	23,00993	0,421	4,77778E-05	4,2E-05	22,65762
1000	0,988	0,0015	103,8235031	25,2874	0,57	0,000065	4,26E-05	23,01344
1250	1,124	0,0018	104,9961138	26,9483	0,735	8,38889E-05	4,29E-05	23,15348
1500	2,097	0,0021	113,0315504	27,56046	0,915	0,000105556	4,5E-05	24,29524
1750	2,701	0,0024	117,7444548	31,94033	1,108	0,000128333	4,65E-05	25,12744
2000	3,009	0,0027	120,0766461	34,65939	1,324	0,00016	4,74E-05	25,58821
2250	4,107	0,003	128,0462262	36,046	1,548	0,00019	5,08E-05	27,43091
2500	4,261	0,0033	129,1247576	40,98959	1,798	0,000226111	5,13E-05	27,71435
2550	5,46	0,00336	137,2330263	41,68301	2,078	0,000269444	5,58E-05	30,13134

EK I b 15° ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{II} (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{I\ e\ \check{s}}$ (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{II\ e\ \check{s}}$ (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{e\ \check{s}}$ (MPa $\sqrt{m}$)	ΔG (J/mm ²)
1895	0,094796	0,000157	89,35003	23,94159	92,44759	46,33465	103,4092	26,30426
2500	0,336062	0,000483	91,44144	24,50199	94,6115	47,4192	105,8297	27,55008
3000	0,478256	0,000284	92,65195	24,82635	95,86398	48,04694	107,2306	28,28433
3500	0,772978	0,000589	95,11195	25,48552	98,40926	49,32263	110,0777	29,80622
4000	1,117949	0,00069	97,91296	26,23606	101,3074	50,77516	113,3195	31,58763
4500	1,459713	0,000684	100,6111	26,95904	104,0991	52,17437	116,4422	33,35254
5000	1,602263	0,000285	101,7154	27,25494	105,2417	52,74703	117,7203	34,0887
5500	1,903757	0,000603	104,0124	27,87043	107,6183	53,9382	120,3787	35,64571
6000	2,383082	0,000959	107,5635	28,82194	111,2925	55,77968	124,4885	38,1212
6500	3,174591	0,001583	113,1841	30,328	117,1079	58,69439	130,9935	42,20925
7000	3,899459	0,00145	118,0975	31,64455	122,1916	61,24234	136,68	45,95343

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	COD (mm)	C (mm/N)	dc/da (1/N)	Komliyors yöntemiyle bulunan ΔG (J/mm ²)
1895	0,094796	0,000157	0,258329	9,33333E-05	0,00006	32,60475
2500	0,336062	0,000483	0,361329	0,000111111	6,03792E-05	33,12588
3000	0,478256	0,000284	0,481329	0,000121667	6,13442E-05	33,43302
3500	0,772978	0,000589	0,624329	0,000134444	6,1913E-05	34,06962
4000	1,117949	0,00069	0,767329	0,000147222	6,30919E-05	34,81476
4500	1,459713	0,000684	0,948329	0,000163833	6,44718E-05	35,55297
5000	1,602263	0,000285	1,149329	0,000181111	6,58389E-05	35,86088
5500	1,903757	0,000603	1,369329	0,000200556	6,64091E-05	36,5121
6000	2,383082	0,000959	1,609329	0,000226111	6,7615E-05	37,54744
6500	3,174591	0,001583	1,870329	0,000253333	6,95323E-05	39,2571
7000	3,899459	0,00145	2,171329	0,000299444	7,26984E-05	40,82282

EK I c 30° ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{II} (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{I\ e\ \check{s}}$ (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{II\ e\ \check{s}}$ (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{e\ \check{s}}$ (MPa $\sqrt{m}$)	ΔG (J/mm ²)
480	0,048	0,0000568	71,49862	41,27853	82,55707	71,49652	109,2127	28,7962
1000	0,203	0,00014	72,58958	41,90839	83,81677	72,58745	110,8792	29,68169
1500	0,395	0,00022	73,9171	42,67481	85,34961	73,91493	112,9069	30,77725
2000	0,537	0,0003	74,8784	43,2298	86,45959	74,87621	114,3753	31,58298
2500	0,661	0,00038	75,71769	43,71435	87,42869	75,71547	115,6573	32,29496
3000	0,805	0,00046	76,66926	44,26372	88,52744	76,66701	117,1108	33,11178
3500	0,979	0,00054	77,81269	44,92386	89,84772	77,81041	118,8574	34,10679
4000	1,233	0,00062	79,44594	45,86679	91,73358	79,44361	121,3521	35,55359
4500	1,555	0,0007	81,47675	47,03924	94,07849	81,47436	124,4541	37,39447
5000	2,011	0,00078	84,2599	48,64605	97,2921	84,25743	128,7053	39,9928
5270	2,512	0,0008232	87,22024	50,35515	100,7103	87,21768	133,2272	42,85234

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	COD (mm)	C (mm/N)	dc/da (1/N)	Komliyans yöntemiyle bulunan ΔG (J/mm ²)
480	0,048	0,0000568	0,0368	8,3504E-06	0,0001056	46,76021
1000	0,203	0,00014	0,050052	9,69904E-06	0,000111733	51,00414
1500	0,395	0,00022	0,131024	1,32778E-05	0,000121874	53,88887
2000	0,537	0,0003	0,242451	2,30294E-05	0,000128767	56,27116
2500	0,661	0,00038	0,403444	3,39413E-05	0,000134459	58,81154
3000	0,805	0,00046	0,583668	4,51752E-05	0,000140529	61,62788
3500	0,979	0,00054	0,78378	6,12298E-05	0,000147259	65,17777
4000	1,233	0,00062	1,003902	8,25884E-05	0,000155741	68,76064
4500	1,555	0,0007	1,244899	0,000107591	0,000164303	72,03791
5000	2,011	0,00078	1,515466	0,000136237	0,000172134	73,23672
5270	2,512	0,0008232	1,824309	0,000180736	0,000174998	74,35235

EK I d 45° ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{II} (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{I\ e\ \check{s}}$ (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{II\ e\ \check{s}}$ (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{e\ \check{s}}$ (MPa $\sqrt{m}$)	ΔG (J/mm ²)
1680	0,1	0,0005024	47,43558	47,43558	66,40981	66,40981	93,91765	21,16926
2000	0,2	0,00056	47,90764	47,90764	67,0707	67,0707	94,85229	21,5927
2500	0,45	0,00065	49,06795	49,06795	68,69513	68,69513	97,14959	22,6513
3000	0,65	0,00074	49,97683	49,97683	69,96756	69,96756	98,94907	23,4982
3500	0,91	0,00083	51,13424	51,13424	71,58793	71,58793	101,2406	24,59919
4000	1,15	0,00092	52,17985	52,17985	73,0518	73,0518	103,3108	25,61551
4500	1,45	0,00101	53,45815	53,45815	74,84142	74,84142	105,8417	26,88594
5000	1,8	0,0011	54,91195	54,91195	76,87673	76,87673	108,7201	28,36815
5500	2,24	0,00119	56,68677	56,68677	79,36148	79,36148	112,2341	30,23157
6000	2,75	0,00128	58,67691	58,67691	82,14767	82,14767	116,1744	32,39155
6350	3,29	0,001343	60,71316	60,71316	84,99843	84,99843	120,2059	34,67872

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	COD (mm)	C (mm/N)	dc/da (1/N)	Komliyors yöntemiyle bulunan ΔG (J/mm ²)
1680	0,1	0,0005024	0,24233	4,86333E-05	0,0001585	85,59
2000	0,2	0,00056	0,36168	0,0000605	0,0001626	87,81534
2500	0,45	0,00065	0,47019	7,54833E-05	0,0001731	93,47792
3000	0,65	0,00074	0,6008	9,16778E-05	0,0001817	98,11004
3500	0,91	0,00083	0,74838	0,0001088	0,0001931	104,2674
4000	1,15	0,00092	0,911369	0,000125811	0,0002039	110,0872
4500	1,45	0,00101	1,12218	0,000151611	0,0002177	117,5457
5000	1,8	0,0011	1,3589	0,000174094	0,0002343	126,5053
5500	2,24	0,00119	1,59249	0,000203711	0,0002559	138,1629
6000	2,75	0,00128	1,743341	0,000238102	0,0002819	152,2245
6350	3,29	0,001343	2,00379	0,000279577	0,0003107	167,7563

EK I e 60° ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{II} (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{I\ e\ s}$ MPa $\sqrt{m}$	$\Delta K_{II\ e\ s}$ MPa $\sqrt{m}$	$\Delta K_{e\ s}$ MPa $\sqrt{m}$	ΔG (J/mm ²)
2000	0,212	0,000101	23,98199	41,5368	47,96187	41,5368	63,44798	9,719056
2500	0,33	0,000102	24,25723	42,01353	48,51233	42,01353	64,17618	9,943429
3000	0,44	0,000103	24,51103	42,45311	49,01991	42,45311	64,84765	10,15259
3500	0,525	0,000105	24,70537	42,7897	49,40856	42,7897	65,3618	10,31422
4000	0,6	0,000106	24,87558	43,08451	49,74897	43,08451	65,81212	10,45683
4500	0,782	0,000108	25,28387	43,79166	50,56552	43,79166	66,89231	10,80291
5000	1	0,00011	25,76441	44,62396	51,52656	44,62396	68,16366	11,21745
5500	1,301	0,000111	26,41356	45,74829	52,8248	45,74829	69,88108	11,78983
6000	1,678	0,000113	27,20646	47,12158	54,41052	47,12158	71,9788	12,50828
6500	2,1	0,000114	28,06407	48,60696	56,12566	48,60696	74,24774	13,30929
7000	2,6	0,000116	29,04932	50,31342	58,09608	50,31342	76,85438	14,2602
7500	3,234	0,000118	30,25354	52,39913	60,50441	52,39913	80,04032	15,467
8000	4,012	0,000119	31,66756	54,84822	63,33234	54,84822	83,78134	16,94662

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	COD (mm)	C (mm/N)	dc/da (1/N)	Komliyans yöntemiyle bulunan ΔG (J/mm ²)
2000	0,212	1E-04	0,11506	2,89611E-05	3,40896E-05	18,40838
2500	0,33	0,0003	0,14632	3,4393E-05	0,000034184	18,45936
3000	0,44	0,0005	0,18782	4,02778E-05	0,000034272	18,50688
3500	0,525	0,0007	0,23782	4,61667E-05	0,00003434	18,5436
4000	0,6	0,0009	0,31156	5,14533E-05	0,0000344	18,576
4500	0,782	0,0011	0,35682	5,87444E-05	3,45456E-05	18,65462
5000	1	0,0013	0,47018	6,49278E-05	0,00003472	18,7488
5500	1,301	0,0015	0,558036	7,18978E-05	3,49608E-05	18,87883
6000	1,678	0,0017	0,67942	8,17222E-05	3,5263E-05	19,04204
6500	2,1	0,0019	0,82732	8,96222E-05	0,0000356	19,224
7000	2,6	0,0021	1,05002	0,000113544	0,000036	19,44
7500	3,234	0,0023	1,2217	0,000139156	3,65076E-05	19,71411
8000	4,012	0,0025	1,45832	0,000154444	3,68899E-05	19,92056

EK I f 75° ÇATLAKLI NUMUNELERE AİT DENEY SONUÇLARI

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	ΔK_I (MPa $\sqrt{m}$)	ΔK_{II} (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{I\ e\ \varnothing}$ (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{II\ e\ \varnothing}$ (MPa $\sqrt{m}$)	$\Delta K_{e\ \varnothing}$ (MPa $\sqrt{m}$)	ΔG (J/mm ²)
2680	0,1	0,0002608	6,419624	23,95382	24,79565	12,38144	27,71506	1,422736
3000	0,151	0,00028	6,451646	24,07331	24,91934	12,4432	27,85331	1,436965
3500	0,223	0,00031	6,496586	24,24099	25,09292	12,52988	28,04732	1,457053
4000	0,343	0,00034	6,570802	24,51792	25,37958	12,67302	28,36773	1,490534
4500	0,451	0,00037	6,636888	24,76451	25,63483	12,80048	28,65304	1,520667
5000	0,5784	0,0004	6,71401	25,05227	25,93271	12,94922	28,98599	1,556213
5500	0,692	0,00043	6,782038	25,30611	26,19547	13,08043	29,27969	1,587909
6000	0,812	0,00046	6,853167	25,57152	26,4702	13,21761	29,58677	1,621391
6500	0,911	0,00049	6,911298	25,78842	26,69473	13,32973	29,83773	1,649014
7000	1,044	0,00052	6,988632	26,07698	26,99343	13,47888	30,1716	1,686123
7500	1,145	0,00055	7,046793	26,294	27,21808	13,59105	30,4227	1,714305
8000	1,2687	0,00058	7,117379	26,55739	27,49072	13,72719	30,72744	1,748821
8500	1,402	0,00061	7,192669	26,83832	27,78152	13,8724	31,05248	1,786015
9000	1,563	0,00064	7,282567	27,17376	28,12875	14,04579	31,44059	1,83094
9500	1,724	0,00067	7,371371	27,50512	28,47176	14,21706	31,82398	1,875865
10000	1,86	0,0007	7,445561	27,78194	28,75831	14,36015	32,14428	1,913815
10500	2,01	0,00073	7,526541	28,08411	29,0711	14,51634	32,49389	1,955672
11000	2,18	0,00076	7,61728	28,42269	29,42157	14,69135	32,88563	2,00311

N (Çevrim)	a (mm)	da/dN (mm/çevrim)	COD (mm)	C (mm/N)	dc/da (1/N)	Komliyors yöntemiyle bulunan ΔG (J/mm ²)
2680	0,1	0,0002608	0,016	6,11111E-06	0,00086606	14,85591
3000	0,151	0,00028	0,019	7,22222E-06	0,000874297	14,85591
3500	0,223	0,00031	0,023	8,33333E-06	0,000885978	14,85591
4000	0,343	0,00034	0,027	9,44444E-06	0,000905586	14,85591
4500	0,451	0,00037	0,031	1,05556E-05	0,00092338	14,85591
5000	0,5784	0,0004	0,036	1,16667E-05	0,000944551	18,04933
5500	0,692	0,00043	0,043	1,27778E-05	0,000963593	19,00102
6000	0,812	0,00046	0,052	1,38333E-05	0,000983876	20,64876
6500	0,911	0,00049	0,063	0,000015	0,00100074	23,26935
7000	1,044	0,00052	0,075	1,61111E-05	0,00102358	26,16923
7500	1,145	0,00055	0,089	1,72222E-05	0,001041066	27,31185
8000	1,2687	0,00058	0,106	1,83333E-05	0,00106265	28,43095
8500	1,402	0,00061	0,126	1,94444E-05	0,001086114	29,1937
9000	1,563	0,00064	0,151	2,11111E-05	0,001114738	30,22091
9500	1,724	0,00067	0,181	2,33333E-05	0,001143673	31,01276
10000	1,86	0,0007	0,216	0,000025	0,001168358	32,22507
10500	2,01	0,00073	0,258	2,72222E-05	0,001195841	34,55974
11000	2,18	0,00076	0,308	0,00003	0,001227314	35,9095