

ÇELİK TEL TAKVİYELİ LAMEL GRAFITLİ DÖKME DEMİRİN KIRILMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Mehmet ŞİMŞİR

Cumhuriyet Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü,
Sivas, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, çelik tel takviyeli lamel grafitli dökme demirin kırılma davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Kompozit üretilirken çelik teller iki farklı oryantasyonda lamel grafitli dökme demir içine yerleştirildi. Kırılma tokluğu ve bükme mukavemetleri üç nokta eğme numuneleri kullanılarak yapıldı. İki farklı takviye hacim oranına sahip kompozit ($V_r=0.05$ ve 0.08) ve takviyesiz lamel grafitli dökme demirin kırılma toklukları tek numune tekniği ile kompliyans ve J- İntegral metotları kullanılarak hesaplandı. Çalışmanın sonunda fiber takviyeli kompozit malzemenin hem kırılma toklukları hem de bükme mukavemetleri takviyesiz lamel grafitli dökme demire nazaran daha yüksek olduğu ortaya konmuştur. Ayrıca, takviye fazın hacim oranı arttıkça kırılma tokluğu ve bükme mukavemetlerinin arttığı saptanmıştır.

Mikroyapı ve kırılma yüzeyleri tarama elektron mikroskobu ile incelendi ve arayüzey enerji dağılım spektroskopi analizi yapıldı. İnceleme sonucunda lamel grafitli dökme demirden çelik tele karbon yayınması sonucu, lamel grafitli dökme demirde yüksek sertliğe sahip geçiş bölgesi oluştuğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Döküm, Elyaf takviyeli kompozitler, Kırılma tokluğu, Mikro yapı

INVESTIGATION OF FRACTURE BEHAVIOR OF STEEL FİBER REINFORCED LAMELLAR GRAPHITE CAST IRON

ABSTRACT

In this study, fracture toughness and strength of steel fiber reinforced lamellar graphite cast iron was investigated. Three point bend specimens were used to calculate the flexural strength and fracture toughness. Two distinct orientation of reinforcement were stacked in the lamellar graphite cast iron. Fracture toughness of the reinforced cast iron with two distinct volume fraction ($V_f =0.05$ and 0.08) were calculated by compliance method and J integral method using single specimen technique. The study shows that steel wire reinforced composite has

higher fracture toughness and flexural strength than lamellar graphite cast iron without reinforcement. Also, fracture toughness and flexural strength increases with increasing volume fraction of reinforcement.

Scanning electron microscopy (SEM) analyses were used to examine the fracture surface and microstructure and interface was analysed by energy dispersive spectroscopy. It is noted that graphite free transition regions with high hardness were observed due to the carbon diffusion from gray cast iron to steel fiber.

Keywords: Casting, Fracture toughness, Fiber reinforced composites, Microstructure

1. GİRİŞ

Kırılgan bir metal fazın sünek bir metal faz ile takviye edilerek, tokluğunun artırılması konusunda çalışmalar süregelmektedir [1-3]. Bu çalışmalarda kırılma davranışı çeşitli mikromekanik mekanizmalarla açıklanmaktadır. Elyaf/matriks arayüzeyinin açılması (debonding) [1,4], elyaf köprülenmesi ve çatlak ucu körelmesi [5], elyaf çekilmesi [6].

Metal matriks kompozit (MMK) üretiminde en önemli faktör matriks faz ile takviye fazın uyumluluğunun sağlanmasıdır. Metalurjik ıslatma ve arayüzey reaksiyonları matriks ile takviye fazının bağlanma kalitesini belirler ve bundan dolayı MMK'in nihayi özellikleri üzerinden son derece etkilidir [7].

Bu çalışmanın amacı, gevrek matriks (lamel grafitli dökme demir) içine tok ve mukavemeti yüksek (çelik tel) takviye fazı eklenerek, mukavemeti ve tokluğu yüksek MMK üretimi sağlamaktır. Çelik tel/dökme demir arayüzey bağını, karbon difüzyonu ile sağlamak ve arayüzeyin dökme demir tarafında lamel grafitlerin bulunmadığı bir yüksek mukavemete sahip bölgenin elde edilmesidir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

Ticari olarak kaynak dolgu malzemesi olarak kullanılan çelik tel, takviye elemanı olarak kullanıldı. Kimyasal bileşimi çizelge 1'de görülmektedir. Matriks malzemesi olarak lamel grafitli dökme demir kullanıldı ve kimyasal bileşimi çizelge 1'de verildi.

Çizelge 1. Diskin kimyasal bileşimi

Malzeme	Bileşim (%)					
	C	Si	Mn	S	P	Fe
Çelik tel	0.4	0.15	0.14	-	-	Kalan
Dökme demir	3.35	1.52	0.61	0.00165	0.001	Kalan

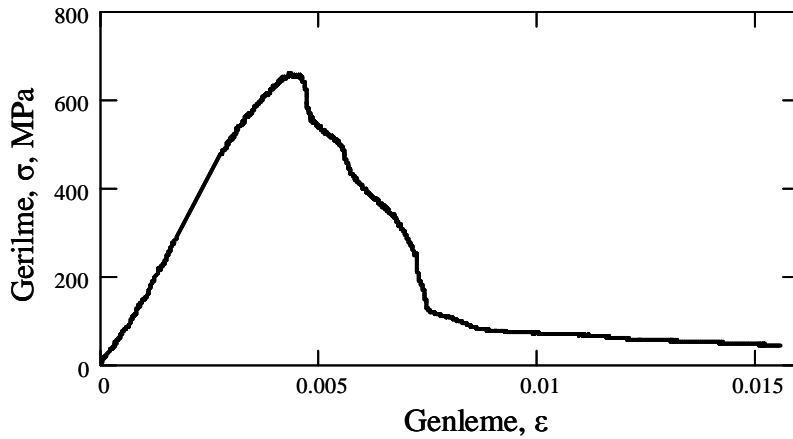
Çelik tel takviyeli kompozit malzeme kum döküm tekniği kullanılarak üretildi. Döküm için 25x50x230 mm ebadında döküm kalıbı hazırlandı. Kullanılan çelik telin çapı 4mm olup, iki farklı yerleşim düzeninde, 2x3 ve 3x3 olacak şekilde kalıbın içine yerleştirildi. Böylelikle, iki farklı takviye hacim oranına sahip, $V_f=0.05$ ve 0.08 , kompozit malzeme üretildi. Döküm 1350 °C sıcaklığında yapıldı ve devamında kalıp içinde soğumaya bırakıldı. Kırılma

tokluğunu karşılaştırabilmek için aynı şartlarda ve boyutlarda takviyesiz lamel grafitli dökme demirde döküldü. Şekil 1de fiberlerin iki farklı yerleşim düzeni gösterilmektedir.



Şekil 1. Çelik tellerin yerleşim düzeni ve üç nokta eğme deney numunesi

Üç nokta eğme test numuneleri hem dökme demir hem de kompozit malzeme için ASTM E-399 standardına uygun olarak hazırlandı. Üç nokta eğme deneyi stroke kontrollü olarak 0.01 mm/sn hızında yükleme yapıldı. Şekil 2 takviye hacim oranı $V_f=0.05$ olan kompozite ait gerilme-genleme eğrisini göstermektedir. Deney sonucunda hem dökme demir hem de kompozit malzemelerin bükülme mukavemetleri (σ) ölçüldü. Bu deney her bir numune için beş defa tekrarlandı ve bükülme mukavemetlerin ortalaması alındı.



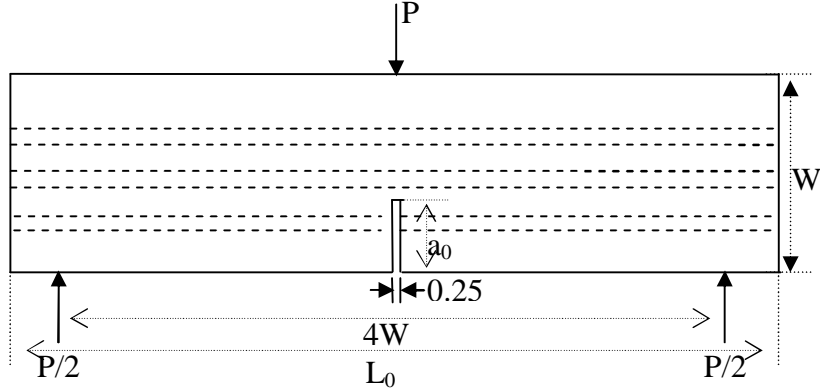
Şekil 2. Takviye hacim oranı $V_f=0.05$ olan kompozit malzemeye ait gerilme –genleme eğrisi.

3. KIRILMA TOKLUĞUNUN ÖLÇÜLMESİ

Kompozit malzemelerin ve dökme demirin kırılma toklukları düzlemsel genleme kırılma tokluğu (K_{Ic}) ve J- integral yöntemleri ile ölçüldü. K_{Ic} kırılma toklu ölçümünde komplians tekniği, J_{Ic} de ise potansiyel enerjide ki değişim ölçülerek hesaplandı

3.1 Komplians Metot

Bu çalışmada, K_{Ic} kırılma tokluğu hesaplanırken tek numune komplians tekniği kullanıldı. Üç nokta eğme numunesi ASTM E-399 standardına uygun olarak hazırlandı. Üç nokta eğme numunesi 220x44x22 mm boyutlarında, başlangıç-çatlak-uzunluğu/numune-genişliği oranı, $a_0/W=0.38$ ve genişlik/kalınlık oranı, $W/B=2$ olarak hazırlandı. Şekil 3 üç nokta eğme test numunesini göstermektedir.



Şekil 3. Üç nokta eğme test numunesinin şematik gösterimi. $a_0/W=0.38$, $W/B=2$ (boyutlar mm dir)

Dökme demir kırılğan bir malzeme olduğu için ön yorulma çatlakları açılmadı. Numuneler universal hidrolik test cihazında stroke kontrollü olarak, 0.01 mm/sn hızında yükleme yapıldı. Deneyler her bir malzeme için üç defa tekrarlandı ve K_{IC} değerleri hesaplandı ve bunların ortalamaları alındı.

Numunelere sırasıyla yükleme/boşaltma şeklinde yükleme yapıldı ve her yüklemede yük eksenini deplasman miktarı bir öncekinin 0.1 mm fazlası uygulandı. Yük boşaltmasında ise yük eksenini değişmeyecek şekilde olabilecek minimum yüke getirildi. Her yükleme boşaltma noktalarında 60 sn rahatlatma zamanı (relaxation time) tutuldu.

Çatlak uzunluğu, boşaltmadan önceki 60 sn içinde fotoğrafları çekildi ve aynı zamanda hareketli mikroskopla da ölçüldü.

Yukarıda anlatıldığı gibi, yükleme/boşaltma işlemi sonucunda yük-yük eksenini deplasman değerleri otomatik olarak hafızaya kayıt edildi. Bu veriler kullanılarak, komplians metoduna göre, K_{IC}, kırılma tokluğu hesaplandı. Komplians, C, yük boşaltma esnasındaki veriler kullanılarak hesaplandı

$$C_i = \frac{\Delta(\text{deplasman})}{\Delta(\text{yük})} \quad (1)$$

C_i - a/W grafiği çizilerek, a/W 'ya bağlı C_i eşitliği elde edildi. Kırılma tokluğu aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı.

$$K_{IC} = \left[\frac{E_{eff}}{(1-\nu^2)} \frac{P_{max}^2}{2BW} \frac{dC}{d\left(\frac{a}{W}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

P_{max} = yük-yük eksenini deplasman eğrisinde ki her yüklemede ki maksimum yük, ν = Poisson oranı, B =numune kalınlığı, W =numune genişliği, E_{eff} =etkin elastik modulus olup hesaplanması ekte verilmektedir.

3.2 J-İntegral Metot

J-İntegral metodu bir birim çatlak oluşu için sistemin potansiyel enerjisindeki değişim olarak tanımlanır. Bu çalışmada, çatlaklı ve çatlaksız numune tekniği kullanılarak kırılma tokluğu, J_{IC} , hesaplandı. J_{IC} değeri çatlaklı ve çatlaksız numunelere ait strain enerji değerlerinden faydalanılarak hesaplandı. Strain enerji yük-yük eksenini deplasman eğrisi altındaki alan olup, J_{IC} aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplandı.

$$J_{ic} = \frac{2(A_n - A_u)}{B(W - a)} \quad (3)$$

A_n =çatlaklı numuneye ait strain enerji, A_u = çatlaksız numuneye ait strain enerji

Ayrıca doğrusal olmayan elastik bir malzemenin kırılma tokluğu için, doğrusal davranışı daha baskın olduğu zaman, J_{IC} kırılma tokluğu önerilmiş ve J_{IC} kırılma tokluğu ile K_{IC} kırılma tokluğu arasında da yakın bir ilişki olup, aşağıdaki eşitlik ile J_{IC} ile K_{IC} arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

$$K_{1c} = \left[\left(\frac{E_{eff}}{1 - \nu^2} \right) J_{1c} \right]^{1/2} \quad (4)$$

4. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

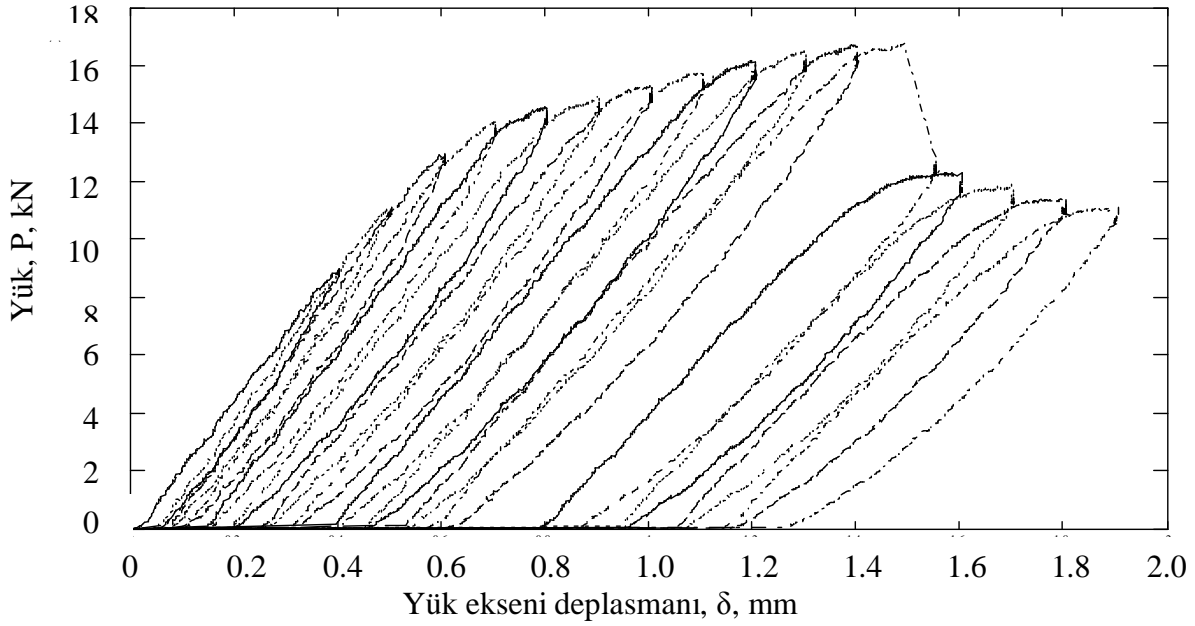
Gri dökme demirin ve iki farklı takviye hacim oranına ($V_r=0.05$ ve 0.08) sahip kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için her bir malzeme için üç nokta eğme deneyi yapıldı. Çizelge 2’de malzemelere ait bükme dayanımları verilmektedir. Takviye fazın miktarı arttıkça, gri dökme demirin bükme dayanımı artmaktadır. Takviyesiz gri dökme demirin bükme dayanımı 421 MPa iken, $V_r=0.05$ ve 0.08 kompozit malzemelerin sırasıyla %40.6 ve %55.1 daha büyük olarak ölçüldü.

Çizelge 2. dökme demir ve kompozit malzemelerin bükme mukavemetleri test sonuçları

Malzeme	Dökme demir	$V_r=0.05$	$V_r=0.08$
Bükme Dayanımı, MPa	421	592	653

4.1 Kırılma Tokluğu

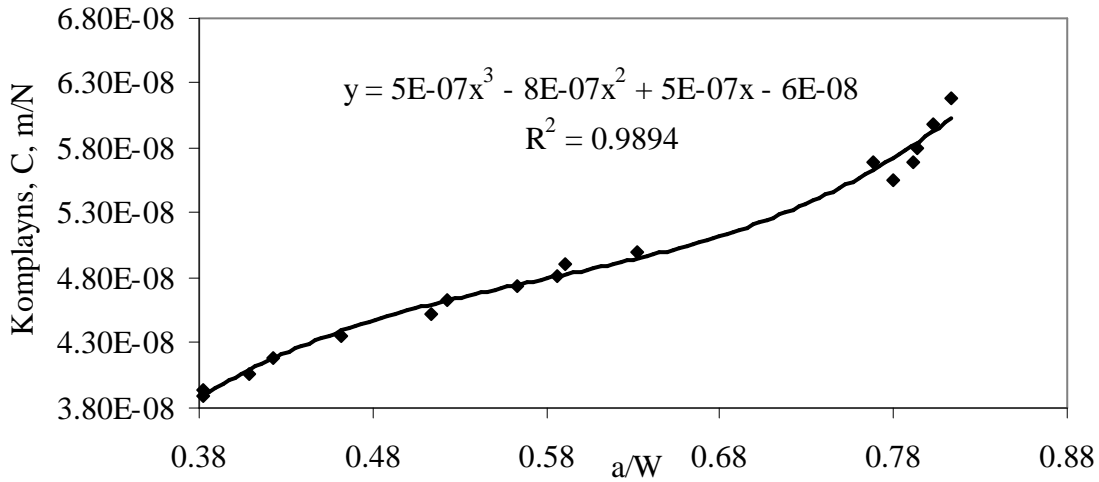
Şekil 4 takviye hacim oranı 0.05 olan kompozit malzemeye ait yük-yük eksenini deplasman eğrisini göstermektedir. Benzer eğri dökme demir ve $V_r=0.08$ olan kompozit malzeme için de elde edildi. Şekil 4’te görüldüğü gibi, yük dördüncü yüklemeye kadar doğrusal olarak artmakta sonraki yüklemelerde doğrusallıktan sapmaktadır ve onikinci yüklemeye ise yük maksimumuna ulaşmakta. Dördüncü yüklemeye kadar fiber yükü taşımaya başlıyor ve plastik olarak deformasyona uğramaktadır. Maksimum yüke ulaştıktan sonra, takviye fazın birinci sırası kırılmakta ve yükte ani olarak düşme görülmekte.



Şekil 4. Komplians method için, Vr=0.05 takviyeli kompozite ait yük-yük eksenli deplasman eğrisi

Şekil 5'te Vr=0.05 kompozit malzemesine ait komplians-a/W grafiği görülmekte. Komplians yük boşaltımı sırasındaki veriler kullanılarak elde edildi. Komplians, a/W'ya bağlı olarak üçüncü dereceden polinom fonksiyonu elde edildi.

$$C = 5 \times 10^{-7} \left(\frac{a}{W} \right)^3 - 8 \times 10^{-7} \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 5 \times 10^{-7} \left(\frac{a}{W} \right) - 6 \times 10^{-8} \quad (5)$$



Şekil 5. Vr=0.05 kompozit malzemesi için komplians-a/W değişimi.

Komplians metodunun geçerliliği numunenin komplians değerlerinin doğru olarak ölçülmesine bağlıdır. Kompozit malzeme, monolitik malzemeye nazaran daha karmaşık bir yapıya sahip olmasından dolayı, malzeme içinde artık gerilmeler daha fazla bulunmaktadır. Bunun için yükleme ve boşaltma yapmadan önce malzeme toparlanması için 60 sn kadar

bekletildi. Aksi taktirde komplians değerleri olması gereken değerlerden ya yüksek yada düşük çıkabilmektedir.

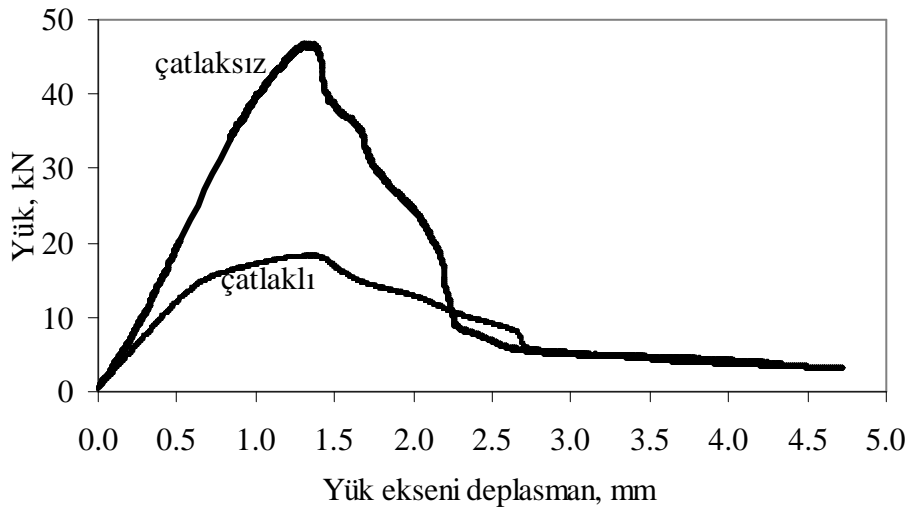
Kırılma tokluğu, K_{IC} , değerleri komplians metoduna göre hesaplandı ve sonuçlar çizelge 3'te görülmektedir.

Çizelge 3. Komplians ve J-integral metoduna göre kırılma tokluğu değerleri

Malzeme	Koplayns Metot, K_{IC} , MPa m ^{1/2}	J-integral metot	
		J_{IC} , kN m ⁻¹	K_{IC} (eşitlik 4), MPa m ^{1/2}
Gri dökme demir	18.30		
Kompozit, $V_r=0.05$	34.42	9.57	36.11
Kompozit, $V_r=0.08$	78.85	42.1	75.13

Çizelge 3'ten görüldüğü gibi lamel grafitli dökme demirin kırılma tokluğu, K_{IC} , çelik tel takviyesi ile artmakta ve takviye hacim oranı arttıkça da artmaktadır. Takviye oranı %5 arttığı zaman, gri dökme demirin kırılma tokluğu %88, takviye oranı %8 arttığı zaman ise, kırılma tokluğu %330 artmaktadır. Takviye fazı daha dayançlı ve tok bir malzeme olup, matriks fazı ise kırılmandır. Bu tür malzeme sistemleri için literatürde benzer sonuçlar bulunmaktadır [1,2,5].

Kritik J integral değeri, J_{IC} , aynı tür numuneye için hem çatlaklı numunenin strain enerji değerinden çatlaksız numunenin strain enerji değerleri çıkartılarak bulundu. Strain enerji yük-yük eksenini deplasman eğrisinin altında kalan alandır. Yük-yük eksenini deplasman eğrisinin altında kalan toplam alan, trapezoid kuralına göre hesaplandı. Şekil 6 hem çatlaklı hem de çatlaksız kompozit numuneye ($V_r=0.05$) ait yük-yük eksenini deplasman eğrileri görülmektedir.



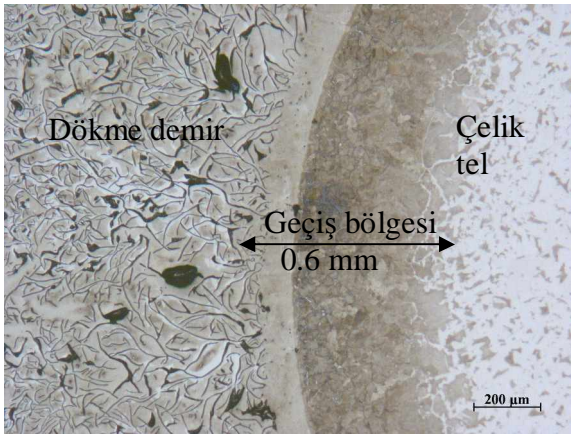
Şekil 6. $V_r=0.05$ kompozit malzemesine ait çatlaksız ve çatlaklı yük-yük eksenini deplasman eğrileri.

Çizelge 3'ten de görüleceği gibi, J_{IC} değeri takviye hacim oranı arttıkça artmaktadır. Takviye hacim oranı 0.08 olan kompozit malzemenin J_{IC} değeri, takviye hacim oranı 0.05 olan kompozit malzemenin J_{IC} değerinden %340 daha büyüktür.

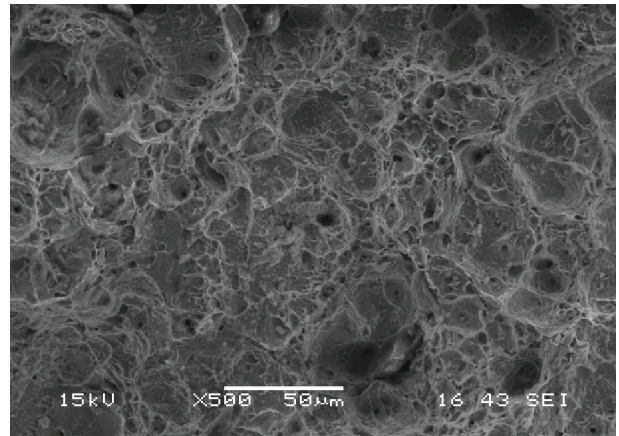
Ayrıca K_{IC} değeri eşitlik 4'e göre de hesaplandı. K_{IC} hem komplians metot hem de J integral metoduna göre hesaplandı ve sonuçları çizelge 3'te verildi. K_{IC} değerleri birbirlerine çok

yakın değerler olarak bulundu. Takviye hacim oranı hem 0.05 olan kompozit için hem de takviye hacim oranı 0.08 olan kompozit için her iki metot için hesaplanan Kıc değerleri arasındaki fark %4.9 dur.

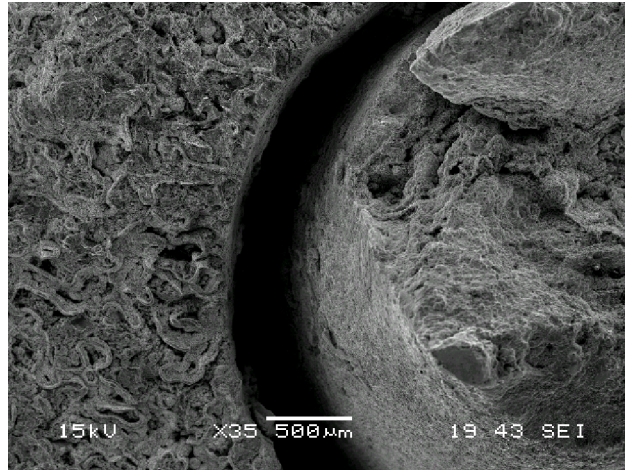
Test numunelerini kırılma yüzeyleri optik mikroskop ve tarama elektron mikroskobu (TEM) ile incelendi. Dökme demir içinde grafit lameller şeklinde bulunduğu için lamellerin keskin uçlarından dolayı yapıda düzensizlik yaratıp, yüklemeye başladığında lamel grafit uçlarında stres yoğunluğunu artmakta ve kırılma uçlardan başlayarak malzeme içine doğru kolayca ilerlemektedir. Dolayısıyla, gri dökme demirin kırılma tokluğu yüksek olmamaktadır. Takviye fazı eklendiği zaman arayüzeyin dökme demir kısmında, karbon (C) difüzyonundan dolayı lamel grafitler bulunmamakta veya çok az miktarda kısmi çözülmüş artık karbonlar bulunmakta olduğu görülmüştür (şekil 7). Ayrıca çelik telin kırılma yüzeyine bakıldığında, sünek bir malzemenin kırılma davranışını gösteren mikro boşluklar ve bu boşlukların birleşmesi mekanizması şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 7. Karbon difüzyonundan dolayı oluşmuş geçiş bölgesi



Şekil 8. Çelik telin kırılma yüzeyi



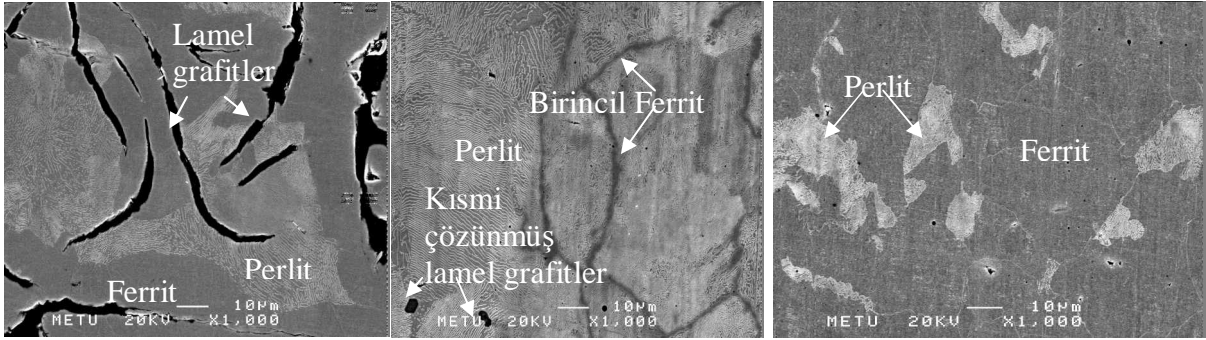
Şekil 9. Arayüzeyin açılması ve çelik telin plastik deformasyona uğraması

Çelik tel takviyeli lamel grafitli dökme demirin kırılma tokluğunun artmasında iki tane önemli mekanizmanın gerçekleşmesine bağlanabilir. Bunlar elyaf körülenmesi ve arayüzey açılması (debonding). Yüklemeye yapıldığında, çatlak dökme demir içinde oluşmakta ve ilerleyerek çelik tele ulaşmakta. Yük artırılmaya devam ettiği zaman, çelik tel yükün büyük bir kısmını taşımaya başlamakta ve aynı zamanda çatlak fiberin etrafını dolaşarak fiberin arkasına

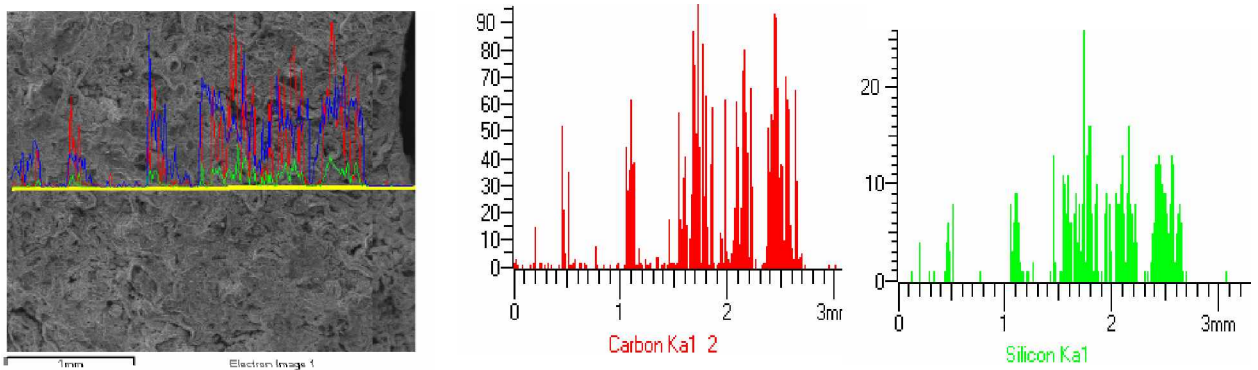
geçmekte (elyaf köprülenmesi). Maksimum yüke ulaşana kadar çelik tel plastik deformasyona uğramakta. Plastik deformasyona uğrarken arayüzey açılmakta (debonding). Şekil 9 dökme demir ile fiber arayüzeyinin açılmasını göstermektedir. Maksimum yüke ulaştığı zaman birinci sıradaki çelik teller kopmakta ve yükte ani bir düşme meydana gelmekte. Bu durum şekil 6’da görülmektedir.

4.2. Mikroyapı

Kompozit malzemenin mikroyapı incelemesi tarama elektron mikroskobu (JEOL 6400) kullanılarak yapıldı. Şekil 10 dökme demirin, geçiş bölgesinin çelik telin merkezinin mikroyapılarını göstermektedir. Geçiş bölgesi yaklaşık olarak 0.6 mm uzunluğunda (şekil 6). Dökme demir ferritik-perlitik, geçiş bölgesi tamamıyla perlitik olup dökme demir tarafında kısmi olarak çözünmemiş C’lar mevcuttur. Çelik telin merkezi ise ferritik-perlitik bir yapıya sahip olduğu görüldü. Dökme demirden çelik tele doğru C difüzyonu açık olarak görülmekte ve geçiş bölgesinde tamamıyla perlitik bir yapının olması bu durumdan kaynaklanmaktadır. Ayrıca yapılan enerji dağılım spektroskopisi (EDS) çizgisel analizi sonuçlarında bu durumu desteklemektedir. Arayüzeye yakın yerlerde C ve Si difüzyonunun olduğu açık olarak görülmektedir.

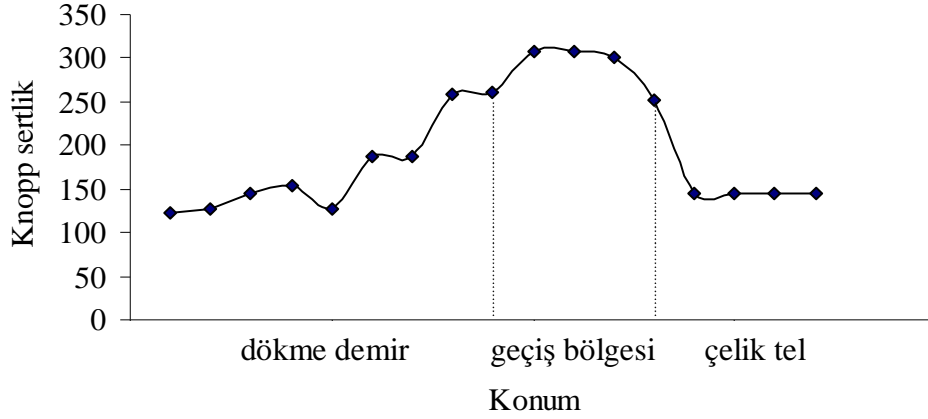


(a) (b) (c)
Şekil 10. Mikroyapılar; a)dökme demir, b) arayüzey, c) çelik telin merkezi.



Şekil 11. Vr=0.05 kompozit malzemesine ait EDS analiz sonucu

Dökme demir den başlayarak çelik tele kadar olan kısımdan Knoop sertlik değerleri ölçüldü. Şekil 12 Knoop sertlik profili görülmekte. Şekilden de görüldüğü gibi, sertlik arayüzeyde artmakta ve durum C difüzyonuna bağlı olarak geçiş bölgesinin tamamıyla perlitlenmesine bağlanmaktadır.



Şekil 12. Arayüzey sertlik profili

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, lamel grafitli dökme demir ve yüksek tokluğa ve dayanca sahip çelik tel ile takviye edilmiş lamel grafitli dökme demirin kırılma davranışı incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1. Çelik tel ile takviye edilmiş lamel grafitli dökme demirin bükülme dayanımı artmakta ve takviye fazın hacim oranı arttıkça, bükülme dayanımı artmaktadır.
2. Lamel grafitli dökme demirin düzlemsel genlemeli kırılma tokluğu, K_{IC} takviye fazı ile ve takviye fazın hacim oranı arttıkça artmaktadır.
3. Düzlemsel genlemeli kırılma tokluğu, K_{IC} hem komplians hemde J integral metodu kullanılarak hesaplanmış ve sonuçları birbiri ile uyum içinde olduğu ortaya konmuştur.
4. Kırılma tokluğunun artışı arayüzey açılma ve fiber köprülenmesi sonucu oluştuğu gösterilmekte.
5. Geçiş bölgesinin dökme demir tarafında, C difüzyonundan dolayı, hemen hemen grafitsizleşmenin olduğu bir bölge oluşmakta. Bunu sonucunda arayüzeyin metalurjik bağlarla tamamıyla bağlandığı ve sertliği yüksek bir geçiş bölgesinin oluştuğu sonucuna varıldı.

KAYNAKLAR

1. Antolovich S. D., Shete P. M., Chanani G. R., 'Fracture toughness of duplex structures: Part I- Tough fibers in a brittle matrix', **Fracture Toughness**, STP 514, 114-134, Philadelphia, PA ASTM, 1972
2. Antolovich S. D., Kasi K., Chanani G. R., 'Fracture toughness of duplex structures: Part II- Laminates in the divider orientation,' **Fracture Toughness** STP 514, 135-150, Philadelphia, PA ASTM, 1972
3. Akdemir A., Arıkan H., Kuş R., 'Investigation of microstructure and mechanical properties of steel fibre-cast iron', **Mater. Sci. Technol.**, 21, 1099-1102, 2005.
4. Qin S., Zhang G., 'Analyses on fracture characteristics of SiC_p-6061Al/6061Al composites extruded by different ratios', **J. Mater. Sci.**, 37, 879-883, 2002.
5. Soboyejo W. O., Ye F., Chen L. C., Bahtishi N., Schwartz D. S., Lederich R. J., 'Effect of reinforcement morphology on the fatigue and fracture behavior of MoSi₂/Nb composites', **Acta Mater.**, 44, (5), 2027-2041, 1996.
6. Chiang C. R., 'Prediction of the fracture toughness of fibrous composites', **J. Mater. Sci.**, 35, 3161-3166, 2000.
7. Arpon R., Narciso J., Louis E., Cordovilla C. G., 'Interfacial reactions in Al/TiC particulate composites produced by pressure infiltration', **Mater. Sci. Technol**, 19, 1225-1230, 2003.