

PARÇACIK TAKVİYELİ AL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN YORULMA ÇATLAK İLERLEME HIZI VE YORULMA ÇATLAK İLERLEME MEKANİZMALARI

Adem KARCI*
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

Eşref ÇAKIR†
Erciyes Üniversitesi, Kayseri

ÖZET

Alüminyum matrisli seramik parçacık takviyeli kompozitler, ticari Al alaşımları ile karşılaştırıldığında, yüksek spesifik mukavemet, rijitlik, yüksek aşınma direnci, artan sertlik ve bazı koşullarda iyi yorulma direncinden dolayı uçak, uzay araçları ve otomotiv komponentlerinin yapısal parçalarında kullanımı artmaktadır. Bu malzemelerin özellikleri; matris malzeme ve parçacık özellikleri, parçacık hacim oranı, boyutu, üretim yöntemi, üretim sonrası uygulanan haddeme, ekstrüzyon ve ısıtma işlemlerinden etkilenmektedir. Ayrıca yorulma çatlak başlangıcı ve yorulma çatlak ilerleme hızı, aynı malzemede gerilme oranı, çekme-basma yükleme sırası, rastsal olarak parçanın kalacağı aşırı yükler gibi farklı yorulma parametrelerinden dolayı değişiklik gösterebilmektedir. Özellikle uçak yapısal parçaları için kullanılacak malzemelerin, hasar tolerans tasarımının bir gereği olarak, yorulma çatlak ilerleme hızı ve davranışının çok iyi karakterize edilmesi gerekmektedir. Bu bildiride mevcut yayınlanmış çalışmalardan farklı takviye oranları ve boyutlarına sahip Al matrisli parçacık takviyeli kompozitlerin yorulma çatlak ilerleme davranışı, yorulma çatlak ilerleme hızı ve etkin çatlak ilerleme mekanizmaları açısından incelenmiştir.

GİRİŞ

Metal matrisli kompozitlerin (MMK) fiziksel ve mekanik özellikleri, bileşenlere (kimyasal kompozisyonu, kristal yapısı, takviyenin şekil ve boyutu), takviyenin hacim oranına ve üretim teknolojisine bağlıdır. Genel olarak metal matrisli kompozitler, matrisin özellikleri (hafiflik, iyi ısı iletkenlik, süneklik) ve seramik parçacık takviyelerin özellikleri (yüksek rijitlik, yüksek aşınma direnci, düşük ısı genleşme katsayısı) dikkate alınarak geliştirilmektedir. Bu malzemeler, temel metal bileşen ile spesifik mukavemet, rijitlik, aşınma direnci, yorulma ve sürünme direnci, farklı ortamlarda korozyon direnci açılarından karakterize edilmekte karşılaştırılmaktadır. Ancak, seramik parçacık bileşenin varlığı, sünekliği, tokluğu, ısı genleşme katsayısını ve termal iletkenliği düşüreceği açıktır [Montanari 2009].

Yorulma çatlak başlangıcı ve ilerlemesi, yüksek performanslı yapısal uygulamalarda temel tasarım kriteri olduğundan Al alaşım metal matrisli kompozitlerde ilgili araştırmalar yapılmıştır [Shin ve Huang 2010, Jogi ve ark. 2008]. Chawla ve ark. [1998] yaptığı çalışmada, artan takviye hacim oranı ile yorulma dayanımı yükselmektedir. Bununla birlikte takviye hacim oranı sabit tutularak yapılan yorulma testlerinde takviye parçacık boyutunun büyümesiyle yorulma direnci azalmaktadır. Ayrıca, S-N eğrilerinde, düşük gerilme seviyelerinde eğriler arasındaki mesafeler artarken, yüksek gerilme seviyelerinde birbirine yaklaşmaktadır.

* Yrd.Doç.Dr., Sivil Havacılık Y.O., E-posta: akarci@erciyes.edu.tr

† Yüksek Lisans Öğrencisi, Sivil Havacılık Y.O., E-posta: esref2304@hotmail.com

MMK'larda yorulma çatlak ilerleme hızını inceleyen çalışmalarda çoğunlukla kompozit malzemelerde matris Al alaşımına göre çatlak ilerleme hızı artmaktadır [John ve ark. 1993, Chawla ve ark. 1998]. Ancak bazı çalışmalarda bunun tersini gösteren test sonuçları da bulunmaktadır [Mason ve Ritchie 1997].

Srivatsan ve Vasudevan [1998] süreksiz parçacık takviyeli Al esaslı MMK'ların yorulma özellikleri ve kırılma karakteristikleri arasında aşağıdaki ilişkilerin olduğunu belirtmektedir.

- Matriks özellikleri (bileşenleri, ısıt işlemler ve mikro yapı)
- Parçacık özellikleri (bileşimi, boyutu, hacim oranı)
- Mikro yapı üzerinde etkili sonradan uygulanan imalat yöntemi
- Test parametrelerinin etkisi (gerilme oranı, gerilme genliği ortalama gerilme)

Birçok durumda yorulma çatlak ilerlemesi, çevrimsel yükleme şartları altında servis hasarlarına neden olan hasar birikim sürecini temsil eden yorulma ömrünün kontrol aşamasıdır. Bu yüzden yorulma çatlak ilerleme davranışının iyi anlaşılması, yorulma ömür tahminleri ve hasar tolerans gereklilikleri açısından çok önemlidir [John ve ark. 1993]. Şekil 1'de görüldüğü gibi özellikle yüksek teknolojinin olduğu endüstrilerde kullanılacak malzemelerin yorulma çatlak ilerleme karakteristiklerinin belirlenmesi gerekmektedir.



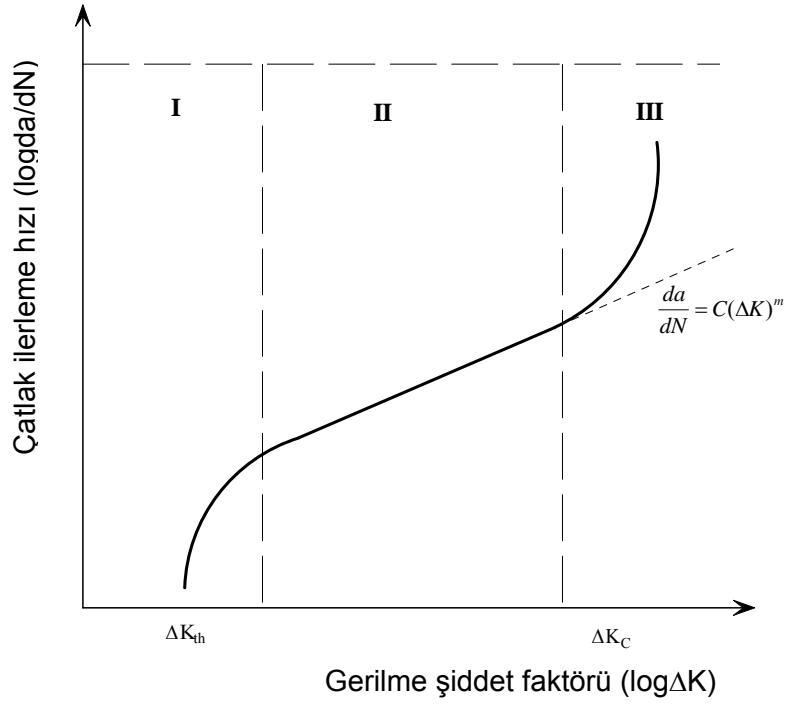
Şekil 1: MMK'dan yapılmış iniş takımı destek dikmesi [Montanari 2009]

YORULMA ÇATLAK İLERLEMESİ

Metal ve metal matrisli kompozitler için yorulma çatlak ilerleme verileri, $\log(da/dN)$ - $\log(\Delta K)$ grafikte gösterildiğinde genellikle Şekil 2'de görüldüğü gibi sigmodial bir eğri şeklinde oluşmaktadır. Bu eğrinin ilk kısmında gerilme şiddet faktörü aralığı ΔK 'nın azalması ile çatlak ilerleme hızı, hızlı bir şekilde azalır ve bir eşik değerin (ΔK_{th}) altında ölçülmesi zorlaşmaktadır. ΔK 'nın artmasıyla oluşan ikinci kısımda, çatlak ilerleme hızı artar ve lineer bir değişim göstermektedir. Bu ikinci kısımda yorulma çatlak ilerleme hızı, ΔK 'nın bir fonksiyonu olan, çevrim başına çatlak ilerlemesi (da/dN), Paris-Erdoğan eşitliği ile iyi karakterize edilmektedir (Eşitlik 1). Maksimum gerilme şiddet faktörünün kırılma tokluğuna yaklaştığı III. kısımda çatlak ilerleme hızı, hızlı bir şekilde artmakta ve parça kırılmaktadır.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

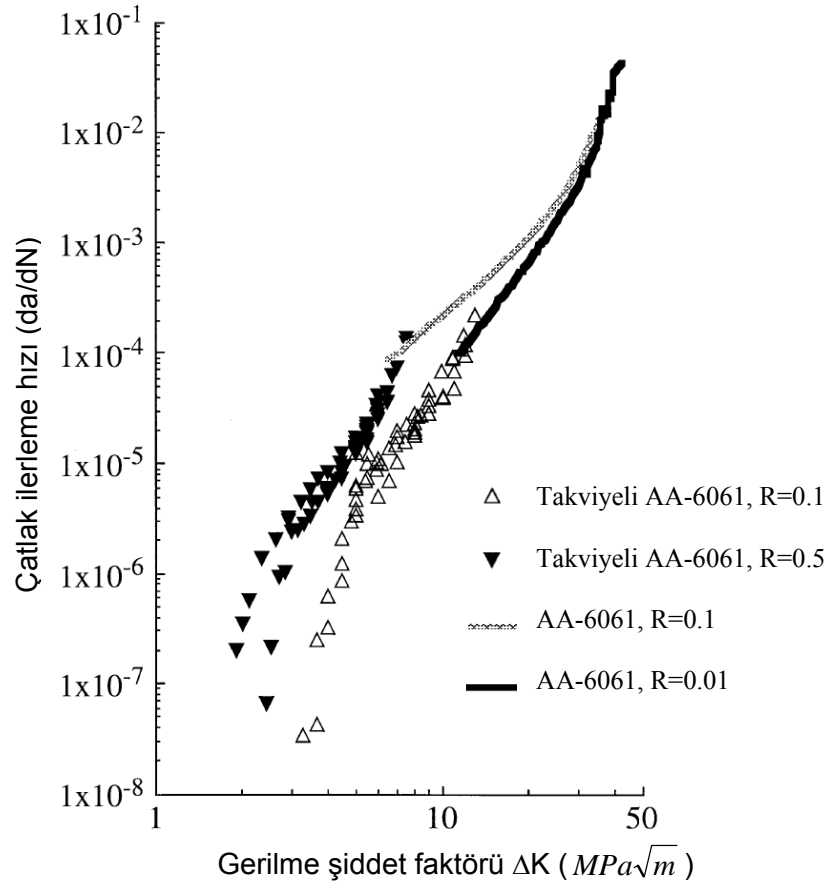
Burada C ve m test ve malzemeye bağlı parametrelerdir.



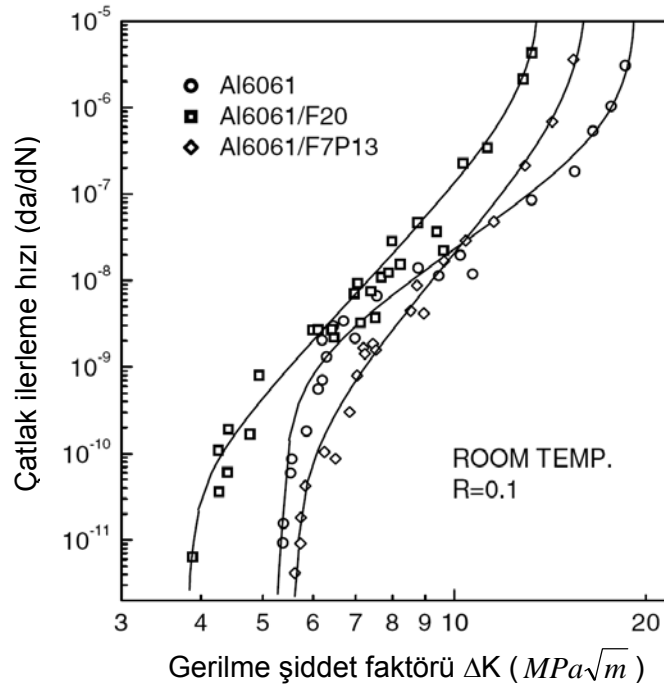
Şekil 2: da/dN – ΔK şematik gösterimi

Gerilme oranının (R), yorulma çatlak ilerleme hızına etkilerine bakıldığında, R'nin artışı ile Al alaşımlarında ve kompozitlerde çatlak ilerleme hızı artmaktadır. Ancak, R'nin artışı eşik gerilme şiddet faktör aralığını daha fazla etkilediği görülmektedir. SiC parçacık hacim oranının artışı, yüksek çatlak ilerleme hızlarında çatlak ilerleme direncini azaltmaktadır. Takviyesiz alaşımlara göre, Al matrisli parçacık takviyeli kompozitler için Eşitlik 1'deki m değeri ve ΔK_{th}'in yüksek olmasının nedeni küçük çatlak açılmasına neden olan yüksek modüle sahip olmasındandır. Ancak Al alaşımına göre kompozitlerde m değerinin büyük olması kırılma tokluğunun düşük olduğunun bir göstergesidir [Chawla ve Ganesh 2010]. Kısa fiber-parçacık hibrid takviyeli kompozitlerde ve bazı tek tip kompozitlerde yapılan testlerde benzer bir çatlak ilerleme davranışı gözlemekle birlikte, eşik gerilme şiddet faktörü aralığını, takviyesiz Al alaşımından daha yüksek bulmuşlardır [Oh ve Han 2007, Mason ve Ritchie 1997, Gasem 2012].

Parçacık takviyeli metal matrisli kompozitlerde lineer çatlak ilerleme hızının olduğu II. Kısımda yorulma çatlak ilerleme hızı açısından 2 farklı durum gözlenmektedir. I. durumda (Şekil 3); metal malzemeye seramik parçacıklar eklendiğinde daha küçük çatlak ilerleme hızı ölçülmekte, ancak II. bölgede çatlak ilerleme hızının artışı daha yüksektir [Crawford ve Griffiths 1999, Chawla ve ark. 1998, Gasem 2012]. II. Durumda ise Şekil 4'te görüldüğü gibi takviyeli alaşımda çatlak ilerleme hızı, takviyesiz alaşıma göre daha hızlı gerçekleşmektedir [Oh ve Han 2007]. Chen ve ark. [2007] A356 Al alaşımında yaptıkları yorulma çatlak ilerleme hızı testlerinde R=0.05 gerilme oranında takviyeli alaşımda çatlak ilerleme hızını takviyesiz alaşıma göre daha hızlı bulmuşlardır. Aynı malzemede R=0.7 oranında yapılan testlerde ise takviyeli ve takviyesiz alaşımda çatlak ilerleme hızları birbirine çok yakın değerdedir [Chen ve ark. 2007].



Şekil 3: Takviyeli ve takviyesiz AA6061alaşımında gerilme şiddet faktör aralığının, ΔK , bir fonksiyonu olarak farklı gerilme oranlarında R, yorulma çatlak ilerleme hızı, da/dN [Crawford ve Griffiths 1999]



Şekil 4: Takviyesiz Al6061alaşımında ve parçacık takviyeli iki kompozitinde yorulma çatlak ilerleme hızı, da/dN [Oh ve Han 2007]

Yorulma ömür ve çatlak başlangıç testleri çoğunlukla düzgün çekme numuneleri şeklinde basit ve alışılmış geometrilere üretilirken, yorulma çatlak ilerleme hızı test numuneleri şekilsel olarak daha karmaşık ve büyük boyutlu olması gerekmektedir. Ayrıca bu testlerde, test süresince çatlak boyunun ölçümü dikkat edilmesi gereken önemli bir konudur.

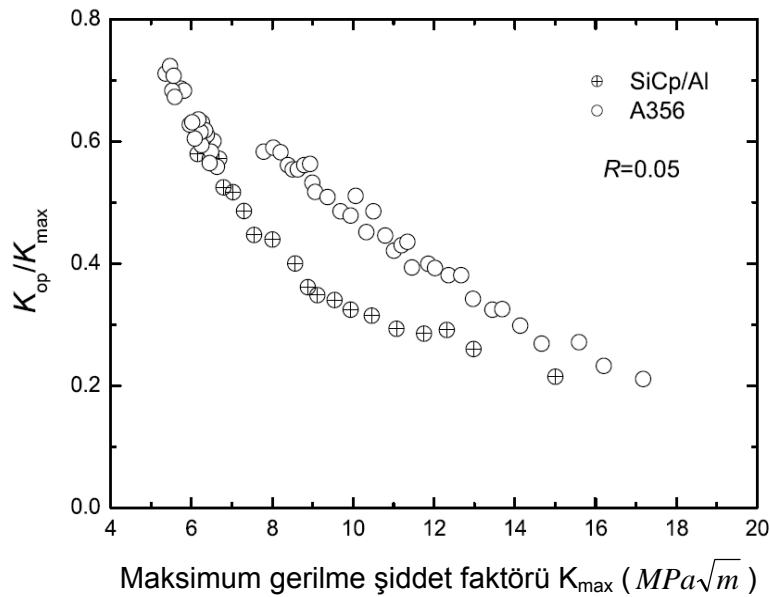
MMK'lerin yorulma davranışı ile ilgili hali hazırda yapılan araştırmalarda farklı gerilme oranı R , gerilme genliği σ_a ve ortalama gerilme σ_m değerlerinde sabit genlikli yorulma çalışmaları yapılmıştır. Bu araştırmalarda farklı kompozit üretim yöntemleri kullanıldığından ve üretim yöntemleri sürekli iyileştiğinden sonuçların kıyaslanması zorlaşmaktadır. Bununla birlikte uçak yapısal komponentleri gibi yerlerde kullanılan parçalar, sabit genlikli çevrimsel yüklemeye çok değişken genlikli çevrimsel yüklemeye maruz kalmaktadır. Bu yüzden sabit genlikli yorulma araştırmalarının yanında tek, blok veya rassal olarak gelebilecek aşırı pozitif ve aşırı negatif çevrimsel yüklerin etkilerini inceleyen sistematik araştırmalara ihtiyaç vardır.

YORULMA ÇATLAK İLERLEME MEKANİZMALARI

Al alaşımlarında çevrimsel yüklemeye altında çatlak ilerlemesi, çatlak ucu bölgesiyle ilişkili olarak, çatlak sapması, körelmesi, kalıntı gerilmeler, deformasyon sertleşmesi ve çatlak kapanması gibi mekanizmalarla açıklanmaya çalışılmaktadır. Al esaslı parçacık takviyeli kompozitlerde ise bu mekanizmalara ek olarak, parçacık kırılması, ara yüzey ayrılması, kırık yüzey pürüzlülüğü gibi mekanizmaların çatlak hızlanması veya yavaşlamasında etkin olduğu görülmektedir [Karcı ve Turan 2006, John ve ark. 1993].

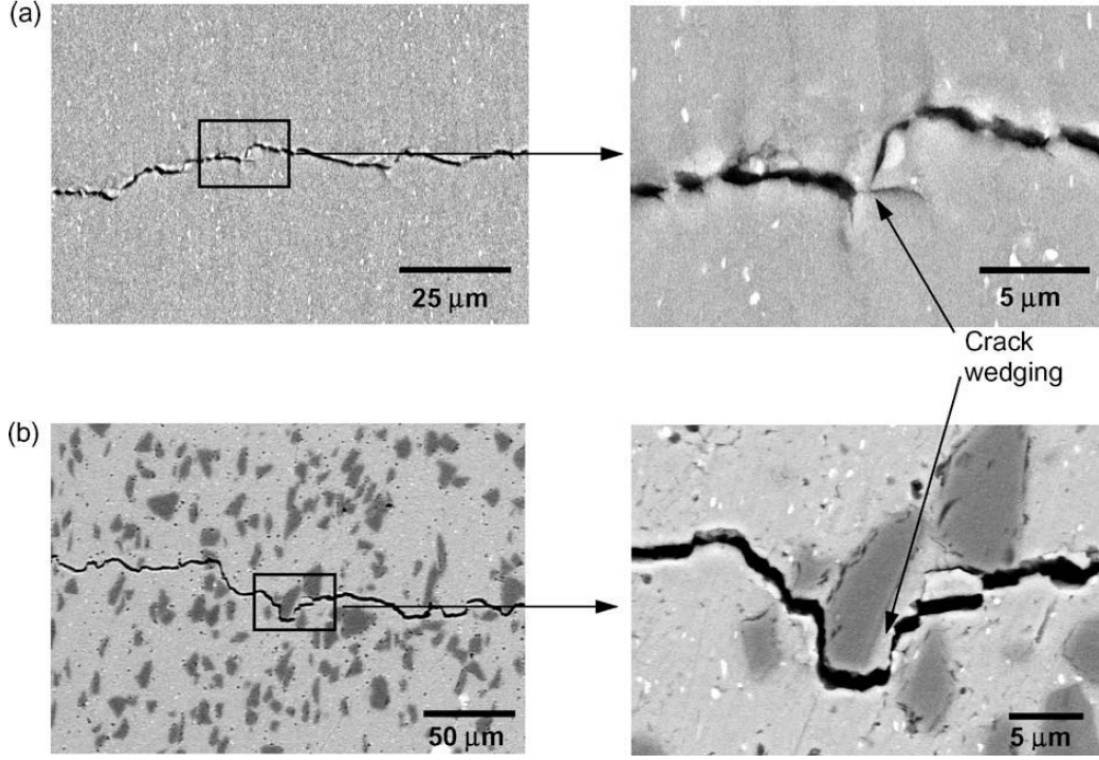
Çatlak kapanması, parçaya çekme yükleri uygulanmasına rağmen, çatlak uç kısmında belirli bir çatlak kapanma gerilme şiddet faktörü K_{cl} değerinin altında çatlak yüzeylerinin birbirine temas etmesi şeklinde tanımlanmakta ve yorulma çatlak ilerlemesini önemli derecede yavaşlatan bir mekanizmadır. Çatlak kapanmasının nedenleri, çatlak ucunda malzemenin plastik şekil değiştirmesi, oksit oluşumu ve çatlak yüzey pürüzlülüğüdür. Takviyeli metal matrisli kompozitlerde özellikle yüzey pürüzlülük kaynaklı kapanma, çatlak hızını önemli derecede etkilemektedir.

Çatlak kapanma davranışı, çatlak açılma K_{op} ve maksimum gerilme şiddet faktörü K_{max} ; K_{op}/K_{max} , K_{max} 'ın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Çatlak kapanması ile ilgili yapılan çalışmalarda değişik sonuçlar gözlenmekle birlikte, Al alaşımlarında, Al esaslı kompozitlere göre orta seviye K_{max} bölgesinde yüksek kapanma seviyesi görülürken düşük ve yüksek K_{max} bölgelerinde yaklaşık aynı kapanma değeri belirtilmektedir (Şekil 5) [Chen ve ark. 2007, Chawla ve Ganesh 2010]. Çatlak ilerlemesi sırasında pürüzlü bir kırık yüzey oluşumu çatlak kapanma etkisini artırmaktadır.



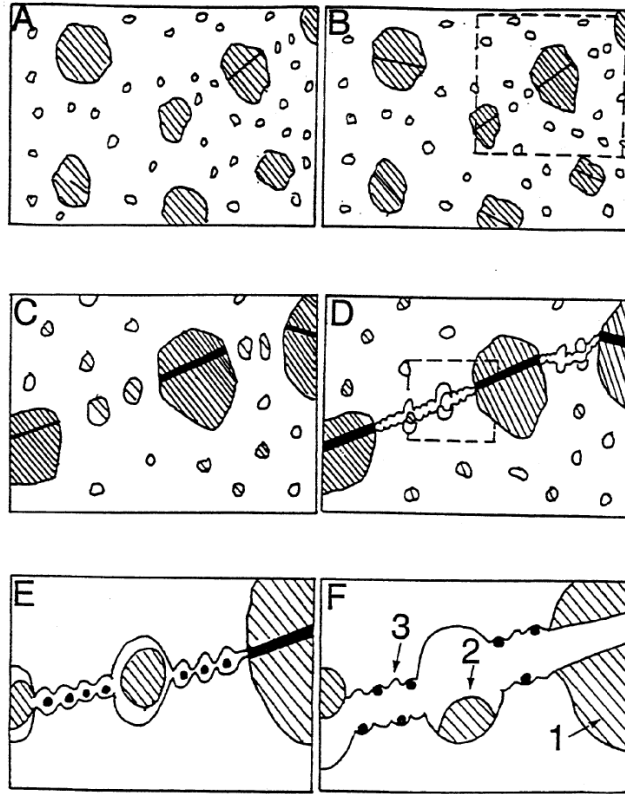
Şekil 5: A356 alaşımı ve SiC/A2024 kompozitinin çatlak kapanma davranışı [Chen ve ark. 2007]

Çatlak ilerlemesi sırasında kompozitlerde Al alaşımlarına göre daha fazla engelle karşılaştığından mikro seviyede daha pürüzlü bir kırık yüzey oluşmaktadır (Şekil 6). Çatlak yüzeylerinde oluşan pürüzlülük, çatlak kapanma K_{cl} değerini artırarak ilerleme hızını düşürmektedir. Bazı araştırmalarda arayüzey ayrılması görülmezken, çoğunluğunda az miktarda da olsa arayüzey ayrılması görülmektedir. Kırık yüzeyler mikroskopik olarak incelendiğinde yüzey pürüzlülüğü açısından takviyesiz alaşım ile kompozit arasında önemli farklılıklar gözlenirken, %20 ve %30 takviyeli kompozitler arasında belirgin bir fark oluşmamaktadır [Chawla ve Ganesh 2010, Jogia ve ark. 2008].



Şekil 6: Çatlak engellemesini gösteren çatlak profili; a) Al alaşımı, b) 2080/SiC/20_p kompozit [Chawla ve Ganesh 2010].

Srivatsan ve Annigeri [2000] Al₂O₃ takviyeli 2014 Al alaşım kompozit malzemenin çekme gerilmesi ve çevrimsel yorulma kırılma davranışını araştırdıkları çalışmada, iki farklı partikül hacim oranında malzemede deformasyon kontrollü yorulma testleri yapmışlar ve bu yükleme şartları için ayrıntılı kırılma yüzey özelliklerini belirlemişlerdir. Farklı sıcaklık ve şartlarda yapılan testlerde temel olarak benzer davranış ortaya çıkmıştır. Makroskobik olarak gevrek kırılma davranışı gözlemlenirken, yüksek büyütme değerlerinde lokal olarak sünek ve gevrek mikroskobik kırılma özellikleri gözlenmiştir. Mikroskobik kırılma yüzeylerinde partikül kırılması ve partikül-matris arayüzey ayrılması baskındır. Yumuşak, sünek ve plastik olarak deforme olan matris malzemenin lokal olarak partikül-matris arayüzeyinde gerilme yığılmalarının etkisi ile partikül kırılmaları ve arayüzey ayrılmaları oluşmaktadır. Şekil 7'de takviyeli alaşımdaki kırılma tipleri şematik olarak gösterilmektedir. Çevrimsel yükleme altında öncelikle büyük boyutlu partiküller ve partikül kümeleri kırılma eğilimi göstermektedir. Uygulanan çevrimsel yük sayısının artışı ile partikül-matris arayüzey hasarı oluşmaya başlamaktadır. Sonra oluşan hasarlar birleşerek çatlak ilerlemesi gerçekleşmektedir.



Şekil 7: 2014/Al₂O₃-T6 metal matris kompozitte çatlak oluşum aşamaları; A) başlangıç durumundaki kompozit, B) küçük gerilme değerinde büyük partiküllerde çatlak oluşumu, C) yüksek gerilme nedeniyle küçük parçacıkların ayrılması ve boşluk oluşturması, D) 2014 metal matris içerisinde küçük partiküllerin ayrılması ve boşluklar oluşturması, E) boşlukların birleşmesi, F) temel kırık yüzey özelliklerinin oluşumu: (1) büyük partiküllerin kırılması, (2) küçük partiküller etrafında gamze oluşumu (3) metal matriste gamze oluşumu [Srivatsan ve Annigeri 2000].

Iqbal ve ark. [2013] döküm Al alaşımı, iğnemsiz Al₂O₃ takviyeli kompozit ve SiC partikül/iğnemsiz Al₂O₃ takviyeli hibrid kompozit 3 nokta eğme numunelerle yaptıkları yorulma çatlak başlangıç ve ilerleme araştırmalarında mikro çatlak başlangıç, ilerleme, durma ve birleşme şeklinde dört aşama gözlemlemişlerdir. Takviyesiz alaşımda çatlak başlangıç yeri Al tanesiyken takviyeli alaşımda takviye/matris ara yüzeyi olmaktadır. Çatlak Al alaşımında tane boyunca ve tane sınırında Si partikül kümelerini takip ederek ilerlemekte, takviyeli alaşımda partiküllerin kırılması veya partikül ara yüzey ayrılması şeklinde ilerlemektedir. Al alaşımlarında yorulma kırık yüzeylerin en önemli karakteristik özelliği yorulma çizgileri takviyeli kompozitlerde partiküller arasında matris malzemelerde oluşmaktadır.

Kaynaklar

Chawla N., Andres C., Jones J.W., ve J.E. Allison, 1998. Effect of SiC Volume Fraction and Particle Size on the Fatigue Resistance of a 2080 Al/SiCp Composite, Metallurgical and Materials Transactions A, 29A, 2843-2854

Chawla N., Ganesh V.V., 2010. Fatigue crack growth of SiC particle reinforced metal matrix composites, International Journal of Fatigue, 32, 856–863

Chen Z., He P., Chen L., 2007. The Role of Particles in Fatigue Crack Propagation of Aluminum Matrix Composites and Casting Aluminum Alloys, J. Mater. Sci. Technol., 23, 213-216

- Crawford B. R., Griffiths J. R., 1999. The role of reinforcement particles during fatigue cracking of a micral-20TM-reinforced 6061 alloy, *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 22, 811–819
- Gasem Z.M., 2012. Fatigue crack growth behavior in powder-metallurgy 6061 aluminum alloy reinforced with submicron Al₂O₃ particulates, *Composites: Part B*, 43, 3020–3025
- Iqbal A., Arai Y. ve Araki W., 2013. Effect of hybrid reinforcement on crack initiation and early propagation mechanisms in cast metal matrix composites during low cycle fatigue, *Materials and Design*, 45, 241–252
- Jogi B.F. Brahmkar P.K., Nanda V.S., Prasad R.C., 2008. Some studies on fatigue crack growth rate of aluminum alloy 6061, *Journal of Materials Processing Technology*, 201, 380–384
- John E., Allison J. Wayne J., 1993. Fatigue Behavior of Discontinuously Reinforced Metal-Matrix Composites, *Fundamentals of Metal Matrix Composites*, Ed: Suresh S., Mortensen A., Needleman A., Butterworth-Heinemann, 269-294
- Karcı A., Turan D., 2006. Fatigue crack growth under periodic block tensile overloading, *The 12th International Conferans on Machine Design and Production*, Kuşadası, 5-8 Eylül
- Mason J.J., Ritchie R.O., 1997. Fatigue crack growth resistance in SiC particulate and whisker reinforced P:M 2124 aluminum matrix composites, *Materials Science and Engineering A*, 231, 170–182
- Montanari R., 2009. Metal matrix composites, <http://dspace.uniroma2.it/dspace/bitstream/2108/857/3/>
- Oh K.H., Han K.S., 2007. Short-fiber/particle hybrid reinforcement: Effects on fracture toughness and fatigue crack growth of metal matrix composites, *Composites Science and Technology*, 67, 1719-1726
- Shin C.S., Huang J.C., 2010. Effect of temper, specimen orientation and test temperature on the tensile and fatigue properties of SiC particles reinforced PM 6061 Al alloy, *International Journal of Fatigue*, 32, 1573–1581
- Srivatsan T.S., Annigeri R., 2000. The Quasi-Static and Cyclic Fatigue Fracture Behavior of 2014 Aluminum Alloy Metal-Matrix Composites, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31A, 959-974
- Srivatsan T.S., Vasudevan V.K., 1998. Cyclic plastic strain response and fracture behavior of 2080 aluminum alloy metal matrix composite, *Int. J. Fatigue*, 20, 187-202