

SİC-PARTİKÜL TAKVİYELİ ALÜMİNYUM METAL MATRİSLİ KOMPOZİTİN STATİK VE YÜKSEK HIZ DEFORMASYON DAVRANIŞININ MODELLENMESİ

İsmail TİRTOM* , Hasan YILDIZ** , Mustafa GÜDEN***

*Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Programı, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

**Makina Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi

***Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü

ÖZET

SİC-partikül 2024 Al matrisli Metal Matris Kompozitin yüksek deformasyon hızlarındaki mekanik davranışı sonlu elemanlar metodu ile modellenmiştir. Modelde viskoplastik matris ve küresel partikülden oluşan aksel simetrik birim hücre kullanılmıştır. Model sonucunda, kompozitin deformasyon hızı duyarlılığının takviyesiz matris malzemesinden daha yüksek olduğu bulunmuştur. Kompozitte artan deformasyon hızı duyarlılığına matrisde deformasyon hızı ile artan gerilmelerin neden olabileceği ileri sürülmüştür. Bulunan sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: SiC-partikül Al kompozit, yüksek hız deformasyon özellikleri, modelleme.

ABSTRACT

The high strain rate mechanical behavior of an SiC-particulate reinforced 2024 Al Metal Matrix composite has been investigated using finite element numerical method. In the model, an axisymmetric unit cell in which a spherical particle embedded inside a viscoplastic matrix was used. As a result of modelling, the strain rate sensitivity parameter of the composite was found to be higher than that of unreinforced matrix. This was attributed to the increase in matrix flow stress with increasing deformation rate. The modelling results were also compared with the experimental results.

Keywords: SiC-particulate Al composite, high strain rate deformation behavior, modelling.

1. GİRİŞ

Metal Matris Kompozit (MMK) malzemeler otomobil, havacılık ve savunma sanayisinde yaygın kullanılan malzemelerdir. Metallerle göre MMK'lerin dayanım/ağırlık oranları, korozyon ve yüksek sıcaklık dirençleri daha yüksektir. Süreksiz fiber takviyeli MMK'ler geleneksel yöntemlerle nispeten düşük maliyetle üretilmektedir. Yaklaşık 30 yıldır termo-mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılan bu malzeme grubunun yüksek hız deformasyon davranışlarını belirlemeye yönelik çalışmalar son yıllarda oldukça artmıştır [1, 2, 3, 4, 5]. Zırh uygulamaları ve darbe olaylarında önem kazanan yüksek hız deformasyon davranışları çeşitli test yöntemleri ile belirlenmektedir. Bu testler örneğin düşen ağırlık, Taylor darbe ve Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) testleridir. Gerilme-birim şekil değişim miktarı davranışını belirleyen SHPB testi en yaygın kullanılan metottur [6, 7, 8].

Yüksek deformasyon hızlarındaki davranışlar malzemelerin ani yük artışlarına uğradığı durumlar olup malzeme davranışları, düşük hızlardaki (statik) davranışlardan oldukça farklı olabilir. Dolayısıyla yüksek deformasyon hızlarının oluşabileceği uygulamalarda malzemelerin mukavemetinin uygulama öncesi hesaplanabilmesi, malzeme israfını ve uygulamada çıkabilecek sorunları azaltmaktadır. Zırh uygulamalarında ise geliştirilen nümerik modellerde malzeme yapısal denklemlerinin, özellikle

mukavemetin deformasyon hızı ile ilişkisinin bilinmesi gerekmektedir. Ancak MMK malzemelerin yüksek hızlardaki mekanik davranışlarını belirlemeye yönelik testler oldukça pahalı ve nispeten uzun zaman almaktadır. Ayrıca, MMK'lerin dinamik davranışlarını fiberin şekli, boyutu, hacim oranı ve matris içindeki dağılımı gibi birçok parametre etkilemektedir. Bu parametrelerin değişimi, yapılması gereken test sayısını da oldukça arttırmaktadır. Yeterli sayıdaki test sonucu ile farklı takviye şekli, boyutu, hacim oranı ve matris çeşidine sahip MMK'lerin yüksek deformasyon hızı özelliklerinin nümerik yöntemlerle belirlenmesi bu malzemelerin yüksek hız deformasyon özelliklerinin ekonomik ve hızlı bir şekilde elde edilmesini sağlayacaktır.

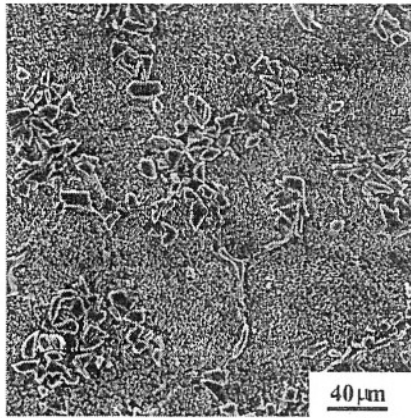
Bu çalışmada SiC-partikül takviyeli 2024 Al matris kompozit malzemesinin statik ve yüksek hız özellikleri nümerik yöntemle belirlenmeye çalışılmıştır. Kullanılan yöntem daha sonra viskır ve kısa fiber takviyeli benzer kompozit yapılara da uygulanacak ve elde edilen sonuçlarla bu malzemelerin yüksek hız deformasyon özelliklerini belirleyen parametreler belirlenecektir. Nümerik sonuçlar statik ve dinamik hızlarda elde edilen malzeme gerilme-birim şekil değişim miktarı davranışları ile karşılaştırılarak, yöntemin uygulanabilirliği test edilmiştir.

2. MMK'LERİN YÜKSEK HIZ DEFORMASYON DAVRANIŞI

Al esaslı kompozit malzemelere yapılan yüksek hız deformasyon testleri bu malzemelerdeki gerilmelerin deformasyon hızı ile arttığını göstermiştir [2, 3]. Deformasyon hızı ile yükselen deformasyon gerilmesinin nedenlerinden birisinin de, matris malzemesindeki gerilmelerin deformasyon hızı ile artmasının sonucudur. Bao ve Lin [9] ve Li ve Ramesh [10] nümerik modelleme sonucunda partikül takviyeli MMK'in deformasyon hızı duyarlılığının takviyesiz matrisden daha yüksek olduğunu buldular. Bu çalışmada ise deformasyon hızı ile gerilmesi artan bir matris yapısına sahip kompozitin deformasyon hızı duyarlılığı sayısal olarak incelenmiştir.

3. MODEL MALZEME

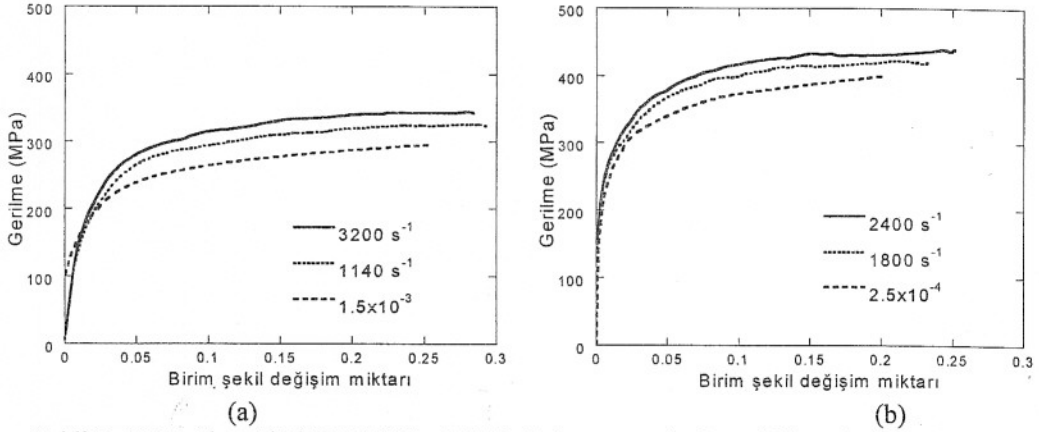
Özellikleri karşılaştırma amacı ile kullanılan model SiC-partikül 2024 Al kompozit, stir döküm meodutu ile üretilmiştir. Mikroyapısı Şekil 1'de verilen kompozitte, partikül hacim yüzde oranı 15 ve partikül ortalama boyutu 20 μm 'dir [11]. Şekil 1'de görüldüğü gibi partiküller döküm esnasında tane sınırlarında yoğunlaşmışlar ve partikül boyutu da homojen değildir (Şekil 1).



Şekil 1 Model SiC-partikül 2024 Al kompozitin mikroyapısı

Model kompozit malzeme ve benzer döküm metodu ilile üretilmiş takviyesiz matris 2024 Al alaşımının statik ve dinamik gerilme-birim şekil değişim miktarı davranışları daha önceki bir çalışmada Instron ve SHPB metodu ile belirlenmiştir [11]. SHPB metodunda, iki uzun çubuk arasına yerleştirilen silindirik nümune, üçüncü bir çubuğun çarpması ile oluşturulan gerilme dalgası ile yüksek hızda basma testine maruz kalmaktadır. Deformasyon esnasında çubuklar üzerinden okunan gerilme dalgaları miktarları kullanılarak nümunenin gerilme-birim şekil değişim miktarı ve deformasyon hızı belirlenmektedir [12]. Oluşan deformasyon hızı üçüncü çubuğun çarpma hızına bağlı olarak değişmektedir.

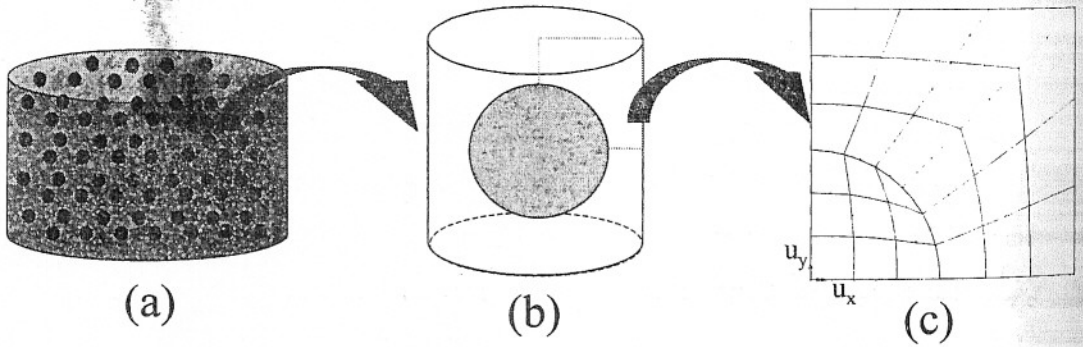
Şekil 2(a) ve (b) takviyesiz matrisin ve kompozitin farklı deformasyon hızlarındaki deneysel gerçek gerilme-birim şekil değişim miktarlarını göstermektedir. Beklenildiği gibi düşük birim şekil değişim miktarlarında (0.05) kompozit, takviyesiz matrisden daha yüksek akma mukavemeti ve birim şekil değişim miktarı sertleşmesi göstermektedir. Yüksek birim şekil değişim miktarlarında ise birim şekil değişim miktarı serleşmesi her iki yapıda da benzer değerlere ulaşmaktadır.



Şekil 2 2024 Al ve SiC/Al MMK'in değişik deformasyon hızlarındaki gerilme-birim şekil değişim davranışları.

4. MODEL

Partiküllerin küresel, eşit hacimli homojen dağılmış olduğu model kompozit yapısı şekil 3(a)'da gösterilmiştir. Birim hücre aksenal simetrik modellenmiştir (Şekil 3(b) ve (c)). Modelde matrisin ve partikül-matris arayüzeyinin yük altında sürekli olduğu varsayılmıştır. Şekil 3(c)'deki mesh yapısı, sonlu elemanlar LUSAS paket programı ile QAX8 aksenal simetrik elemanı (8 düğüm noktalı, dörtyüzlü, eğrisel) kullanılarak çözülmüştür.

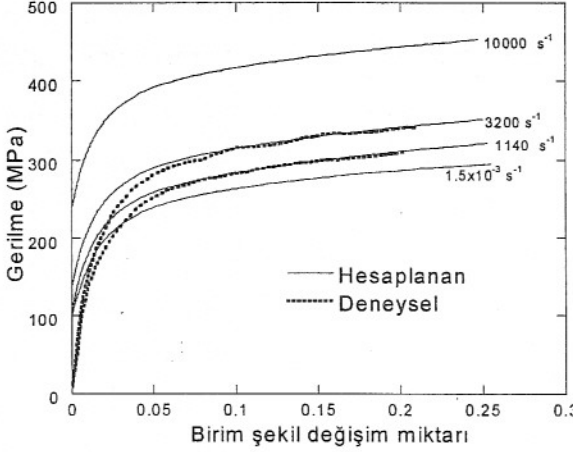


Şekil 3 Birim hücre oluşumu a) kompozit b) birim hücre ve c) aksenal simetrik mesh.

Matrisin yapısal denklemi statik ve yüksek deformasyon hızlarında elde edilen % 6 birim şekil değişim miktarına tekabül eden akma gerilmesi kullanılarak bulunmuştur. Akma gerilmesi aşağıdaki denkleme uydurulmuştur:

$$\sigma(\varepsilon) = \sigma_s + k \varepsilon \quad (1)$$

Denklemler 1'de σ deformasyon hızındaki gerilme, σ_s statik gerilme, k deformasyon hızı duyarlılığı ve ϵ ise deformasyon hızıdır (birim şekil değişim miktarı hızı). Şekil 4'de takviyesiz matrisin değişik deformasyon hızlarında hesaplanan ve deneysel gerilme- birim şekil değişim miktarı grafikleri verilmiştir. Deneysel sonuçlarla hesaplanan gerilmeler %6 birim şekil değişim miktarından sonra oldukça yakındır. Grafiklerin ilk bölgelerindeki uyumsuzluk SHPB test metodunun düşük birim şekil değişim miktarlarındaki gerilmeyi hassas ölçememesinden kaynaklanmaktadır [8].



Şekil 4 2024 Al takviyesiz matrisin değişik hızlardaki gerilme-birim şekil değişim miktarı grafikleri.

SiC partikülleri lineer elastik kabul edilmiş olup elastik modülü (E) 450 Gpa ve poisson oranı (ν) 0.17 alınmıştır. 2024 Al matrisi için LUSAS programı içinde tanımlanmış olan katılaşmayı içeren Von Mises gerilmesi kullanılmıştır. Modelde, matris malzemesinin gerilme-birim şekil değişim miktarı değerleri farklı deformasyon hızları için tablo halinde programa girilmektedir. Eksenel simetrik modelde sınır koşulları şöyledir: sol kenarda $u_x = 0$ ve alt kenarda $u_y = 0$ alınmıştır (Şekil 3(c)). Ayrıca, kuvvetin uygulandığı üst kenarda, nodların deformasyonu eşit olacak şekilde kısıtlandırılmıştır. Modelde birim hücrede y yönünde deformasyon % 30 miktarına kadar %1 artırılarak birim hücre içerisinde oluşan gerilmeler hesaplanmıştır.

Partikül ile kuvvetlendirmenin kompozitin gerilme-birim şekil değişimi miktarı grafiklerinin belirlenmesi için birim hücrede oluşan gerilmelerin ve şekil değişim miktarlarının ortalaması alınmıştır [13]. Kompozitte ortalama eşdeğer gerilme aşağıdaki formülle hesaplanmıştır;

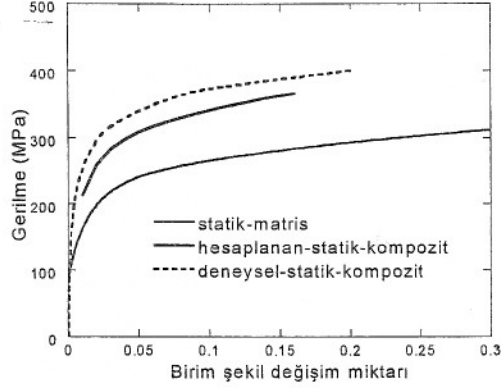
$$\sigma_c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i \quad (2)$$

Burada σ_i ve N sırasıyla elemanın gauss noktalarındaki eşdeğer gerilmesi ve toplam gauss noktası sayıdır.

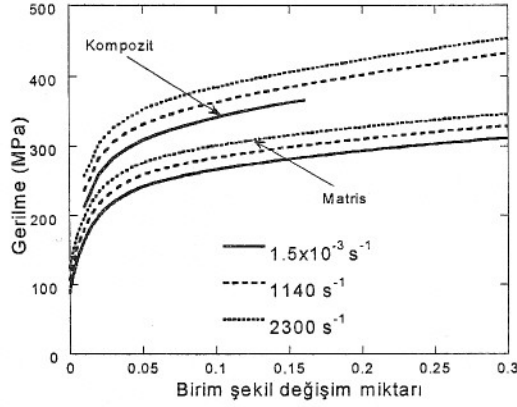
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Şekil 5'de kompozitin statik ($1.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) nümerik ve deneysel gerilme-birim şekil değişim miktarı grafikleri ve matrisin statik gerilme-birim şekil değişim miktarı grafiği gösterilmiştir. Kompozitte, deneysel gerilme miktarları nümerik değerlerden yaklaşık 30 MPa daha yüksektir. Şekil 6'da matrisin ve kompozitin hesaplanan gerilme-birim şekil değişim miktarı davranışları değişik deformasyon hızlarında gösterilmiştir. Şekil 7'de %6 birim şekil değişim miktarına tekabül eden gerilmeler deformasyon hızına karşılık çizilmiştir. Bu grafiklerdeki veriler Denklem 1'e uydurulmuştur. Kompozitin hesaplanan

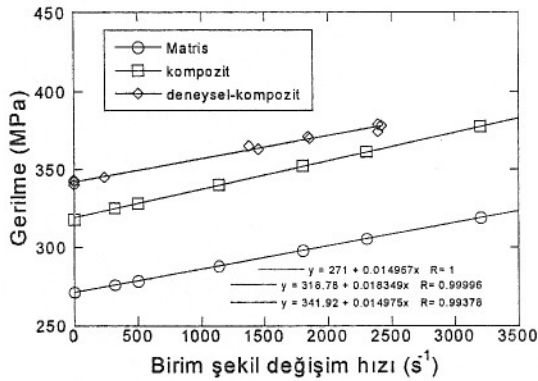
deformasyon hızı duyarlılığı (0.0183) takviyesiz matristen daha yüksektir (Şekil 7). Ancak deneysel olarak bulunan kompozit deformasyon hızı duyarlılığı nümerik değerden daha küçük ve takviyesiz matrisinkine oldukça yakındır (0.0149).



Şekil 5 Kompozitin hesaplanan ve deneysel statik davranışları ve matrisin statik davranışı.



Şekil 6 Kompozitin (hesaplanan) ve matrisin farklı deformasyon hızlarındaki davranışları.



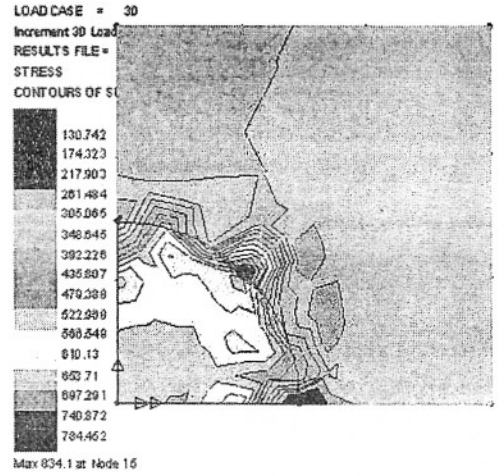
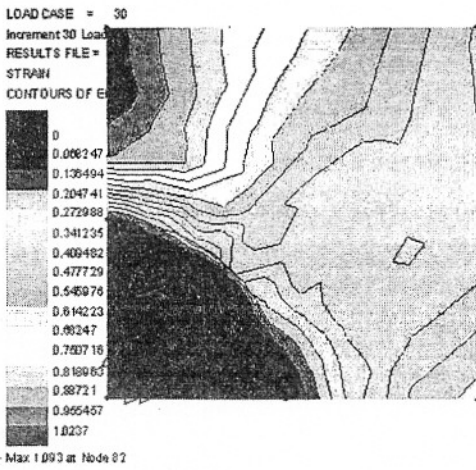
Şekil 7 %6 birim şekil değişim miktarı gerilmesine karşılık deformasyon hızı.

Kompozitin nümerik ve deneysel bulunan statik ve yüksek hız davranışlarındaki farklılıkların nedenleri şöyle sıralanabilir; a) model kompozitdeki partiküllerin homojen olmayan boyutu ve dağılımı, b) partiküllerin küresel olmaması c) kompozitdeki matrisin ve takviyesiz matrisin mikroyapılarındaki farklılıklar, örneğin tane boyutu ve ikincil faz miktarlarındaki farklılıklar ve d) üretim esnasında kompozitte matris ve partikülün termal uzama miktarlarındaki farklılıklardan kaynaklanan iç gerilmeler. Sıralanan farklılıkların etkileri daha sonra detaylı incelenecektir.

Yüksek hız deformasyonunda ortaya çıkan plastik deformasyondan kaynaklanan malzeme ısınması malzeme gerilmesini azaltmaktadır. Adiyabatik ısınma olarak adlandırılan bu olay, gerilmelerin daha yüksek olduğu kompozit yapıda daha yüksek sıcaklık artışına neden olabilir. Bu da kompozitin deformasyon hızı duyarlılığını azaltabilir. Deneysel ve nümerik duyarlılıklardaki farklılığın bir diğer nedeni ise mikroyapıdan kaynaklanabilir. Örneğin ısıtılmış Al alaşımlarının deformasyon hızı duyarlılığı ısıtılmamış alaşımdan daha düşük olduğu bulunmuştur [14]. Nümerik ve deneysel duyarlılık değerlerinin karşılaştırılabilmesi için daha yüksek hızlarda testler yapılması faydalı olacaktır.

Benzer birim şekil değişim miktarlarında, matrisdeki birim şekil değişim miktarlarının ortalaması takviyesiz matrisden daha yüksektir. Bu durum Şekil 8(a)'da ortalama %30 birim değişimi için birim hücredeki birim şekil değişim miktarı dağılımında gösterilmiştir. Matris içerisindeki ortalama birim şekil değişim miktarı, kompozitin ortalama birim şekil değişim miktarından daha yüksektir. Dolayısı ile artan birim şekil değişim miktarları kompozitteki gerilmeleri takviyesiz matrise nispeten arttıracaktır. Birim hücredeki gerilme dağılımı Şekil 8(b)'de gösterilmiştir. Deformasyon hızının etkisi ise şöyle açıklanabilir; deformasyon hızı ile artan matris gerilmesi, kompozitdeki ortalama gerilmenin artmasına neden olmaktadır. Yüksek gerilmelerde bu artış, kompozitin deformasyon hızı duyarlılığının, takviyesiz matris duyarlılığından daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Benzer bir sonuç Bao ve Lin [9] tarafından da bulunmuştur.

Modelde, seramik partikülün çalışılan deformasyon hızlarında deformasyon hızına duyarsız olduğu kabul edilmiştir. Deneysel sonuçlar seramiklerin kırılma mukavemetinin 3000-4000 s-1 hızlarına kadar değişmediğini göstermiştir [15]. Dolayısı ile kullanılan modelde kompozitin deformasyon hızı duyarlılığını etkileyebilecek tek neden matrisin duyarlılığıdır. Modelde matris içerisindeki deformasyon hızı dağılımına bağlı gerilmeler ihmal edilerek, kompozitdeki matrisin sabit bir hızda deforme olduğu kabul edilmiştir. Daha hassas hesaplamalar için birim hücredeki matrisdeki deformasyon hızı dağılımının göz önüne alınarak modelin geliştirilmesi ileriki çalışmalarda geliştirilecektir.



Şekil 8 %30 ortalama birim şekil değişim miktarında, birim hücredeki eşdeğer birim şekil değişim miktarı ve eşdeğer gerilme dağılımı.

Geliştirilen model viskır ve kısa fiberli kompozitlerde uygulanabilir. Modelin en büyük avantajı hızlı ve ekonomik olmasıdır. Modelin uygulanabilirliği farklı yapılaraya sahip kompozitlerin deneysel sonuçları ile karşılaştırılarak test edilecektir.

6. SONUÇLAR

Partikül takviyeli 2024 Al MMK'in deformasyon hızına bağlı gerilme-birim şekil değişim miktarı davranışı takviyesiz matrisin davranışı kullanılarak modellenmiştir. Kullanılan modelde, kompozitdeki matrisin sabit bir hızda deforme olduğu kabul edilmiş ve deformasyon hızına bağlı matris gerilmeleri modele konulmuştur. Hesaplamalar sonucunda kompozitin deformasyon duyarlılığı takviyesiz matrisden

daha yüksek olduğu bulunmuştur. Bu sonuç ise matris gerilmelerinin deformasyon hızı ile artmasından kaynaklanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] Z. Ling, L. Luo and B. Dodd, J. De Physique IV, 4,(1994) C8-453.
- [2] C-C. Perng, J-R. Hwang and J-L. Doong, Mater. Sci. Eng., A171 (1993) 213.
- [3] R. Vaziri, D. Delfosse, G. Pageau and A. Poursartip, Int. J. Impact Eng., 13 (1993) 329
- [4] S. I. Hong, G. T. Gray III and J. J. Lewandowski, Acta Metall. Mater., 41 (1993) 2337.
- [5] D. R. Chichili and K. T. Ramesh, Int. J. Solids Struct., 32 (1995) 2609
- [6] J. Hopkinson, J. Proc. Manchest. Liter. Philos. Soc., 11 (1872) 40.
- [7] B. Hopkinson, Phill. Trans. R. Soc. Lond., A213 (1914) 437.
- [8] W. Chen, G. Subbash and G. Ravichandran, DYMAT J., 3 (1994) 193.
- [9] G. Bao and Z. Lin, Acta Metall. Mater., 44 (1996) 1011.
- [10] Y. Li, K. T. Ramesh, Acta Metall. Mater., 46 (1998) 5633
- [11] M. Güden, Doktora Tezi, University of Delaware 1997.
- [12] H. Kolsky, Proc. Phys. Soc. London, B62 (1949) 676.
- [13] C.R. Chen, S. Y. Qin, S.X. Li, J.L. Wen, Mater. Sci. & Eng A, 278 (2000), 96.
- [14] D. L. Holt, S. G. Babcock, S. J. Green, C. J. Maiden, Trans. ASM, 60 (1967) 152.
- [15] J. Lankford, Comm. Amer. Ceram. Soc. C-33 (1981).