

ÇELİK TEL KATKILI ALUMİNYUM KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Dokuz Eylül Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Malzeme Bilimleri Anabilim Dalı

109664

Özgür GÜÇLÜ

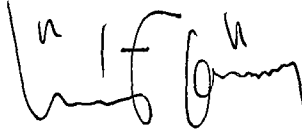
109664

Temmuz, 2001

İZMİR

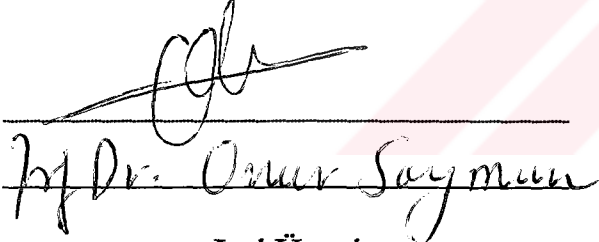
Yüksek Lisans Tezi Sınav Sonuç Formu

Özgür GÜÇLÜ tarafından Doç. Dr. Ümit CÖCEN yönetiminde hazırlanan “Çelik Tel Katkılı Alüminyum Kompozitlerin Üretimi” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

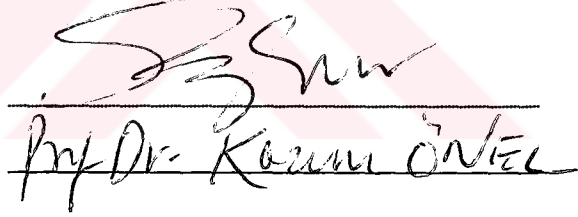


Doç. Dr. Ümit CÖCEN

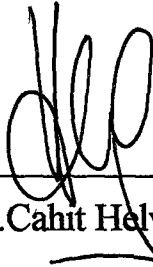
Yönetici



Jüri Üyesi



Jüri Üyesi



Prof. Dr. Cahit Helvacı

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında beraber çalıőtıđım danıőman hocam Doç. Dr. Ümit CÖCEN ve Araő. Gör. Mustafa Reőit ÖZER başta olmak üzere, Makina Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Prof. Dr. Onur SAYMAN' a, araştırma görevlisi arkadaşlarıma, Mak. Tek. Ahmet YİĞİT' e, İstaş Isıl İşlem Sanayi' ne, İzmir Kalıp Sanayi' ne, Ne-Ka Kalıp Sanayi' ne, Cevher Döküm Sanayi' ne ve son olarak da desteklerini benden hiç esirgemeyen sevgili aileme teőekkürü bir borç bilirim.

Özgür GÜÇLÜ

ÖZET

Bu çalışmada, takviyesiz alüminyum matris alaşımının, %10 fiber hacim oranlarında çift ve tek yönlü çelik fiber takviyeli alüminyum matris kompozitlerinin sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretimi yapılmıştır.

Üretilen bu malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiş ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Çift yönlü fiber takviyeli alüminyum matris kompozitlerinin, takviyesiz alüminyum matris alaşımının değerlerine bile ulaşmadan hasara uğradığı görülmüştür. Oysa tek yönlü çelik fiber takviyeli alüminyum matris kompozitlerinin sonuçlarının, teorik değerlerine çok yakın olduğu bulunmuştur.

ABSTRACT

In this study, unreinforced aluminum matrix alloy, woven and unidirectional steel fiber reinforced aluminum matrix composites with a fiber volume fraction at 10% are produced by squeeze casting methods.

The mechanical and physical properties of these materials are determined, and microstructural investigations are carried out. It is observed that the ultimate tensile strength values of woven steel fiber reinforced aluminum matrix composites are less than unreinforced aluminum matrix alloy. However the results of unidirectional steel fiber reinforced aluminum matrix composites are found so similar with its theoretical results.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
Teşekkür.....	I
Özet	II
Abstract	III
İçindekiler	IV
Tablo Listesi	VIII
Şekil Listesi	IX

Bölüm I

GİRİŞ

1.1 Giriş	1
-----------------	---

Bölüm II

SIKIŞTIRILMIŞ DÖKÜM

2.1 Giriş	3
2.2 Tarihçe	4
2.3 İşlem Sırası	5
2.4 Sıkıştırılmış Dökümün Sınıflandırılması	6
2.5 Döküm Kalitesini Etkileyen Faktörler	8

2.5.1 Alaşım	9
2.5.2 Eriyik Kalitesi ve Miktarı	9
2.5.3 Düzenek	10
2.5.4 Döküm Sıcaklığı	11
2.5.5 Düzenek Sıcaklığı	12
2.5.6 Basınç Uygulamasından Önceki Bekleme Zamanı	12
2.5.7 Yağlama	13
2.5.8 Basınç Seviyesi ve Süresi	14
2.6 Sıkıştırılmış Dökümün Üstünlükleri ve Sakıncaları	15
2.7 Kuramsal İnceleme	16
2.8 Sıkıştırılmış Döküm Malzemelerin Mikroyapısı	19

Bölüm III

KOMPOZİT MALZEMELER

3.1 Giriş	22
3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	22
3.2.1 Sürekli Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler	23
3.2.1.1 Fiberlerin Özellikleri	23
3.2.1.2 Whiskerlerin Özellikleri	24
3.2.1.3 Matris Malzemelerinin Özellikleri	25
3.2.2 Tabakalı Kompozit Malzemeleri	26
3.2.3 Süreksiz Tane (Partikül) Kompozit Malzemeler	26
3.2.4 Kompozit Malzemelerin Kombinasyonları	26
3.3 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üstünlükleri	27
3.3.1 Dayanım ve Esneklik Üstünlükleri	27
3.3.2 Maliyet Üstünlükleri	27
3.3.3 Ağırlık Üstünlükleri	28
3.4 Kompozit Malzemelerin Uygulamaları	28
3.5 Sıkıştırılmış Dökümün Metal Matris Kompozitlerindeki Yeri	29
3.6 Kompozit Malzemelerin Mekanikliği	31

3.6.1 Elastiklik Yaklaşımları	31
3.6.1.1 E_1' in Belirlenmesi	32
3.6.1.2. E_2' nin Bulunması	34
3.6.1.3 ν_{12}' nin Belirlenmesi	37
3.6.1.4 G_{12}' nin Belirlenmesi	39
3.6.2 Dayanım Yaklaşımları	41

Bölüm IV

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Deney Düzenegi	46
4.2 Malzeme	47
4.3 Üretim	48
4.4 Çekme Deneyi	50
4.5 Iosipescu Deneyi	50
4.6 30° lik Çekme Deneyi	51
4.7 Basma Deneyi	51
4.8 Termal Genleşme Katsayılarının Tespiti	52
4.9 Sertlik Ölçümleri	52
4.10 Tavlama İşlemleri	52
4.11 Mikroyapısal İnceleme	52

Bölüm V

SONUÇLAR

5.1 Çekme Deneyi Sonuçları	53
5.2 Iosipescu Deneyi Sonuçları	57
5.3 30° lik Çekme Deneyi Sonuçları	58
5.4 Basma Deneyi Sonuçları	59

5.5 Termal Genleşme Deney Sonuçları	60
5.6 Sertlik Ölçümleri Sonuçları	60
5.7 Yoğunluk Hesaplamaları	61
5.8 Mikroyapı	62

Bölüm VI TARTIŞMA

6.1 Düzenek ve Üretim	71
6.2 Mekanik Özellikler	72
6.3 Arayüzey Reaksiyonları ve Mikroyapı	75

Bölüm VII SONUÇ

7.1 Sonuç	79
Kaynaklar	81

TABLO LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3. 1 Fiber ve tel özellikleri	24
Tablo 3. 2 Whisker özellikleri	25
Tablo 3. 3 Çeşitli E_f/E_m ve V_f değerleri için E_2/E_m değerleri	35
Tablo 4. 1 Matris alaşımının kimyasal bileşimi	47
Tablo 4. 2 Fırında eritilerek dökülen matris alaşımının kimyasal bileşimi	49
Tablo 5. 1 Çekme deneyi sonuçları	54
Tablo 5. 2 Tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin teorik mukavemet değerleri	54
Tablo 5. 3 Iosipescu deneyi sonuçları	58
Tablo 5. 4 Tek yönlü kompozit malzemelerin 30°' lik çekme deneyi sonuçları.....	58
Tablo 5. 5 Termal genleşme katsayıları	60
Tablo 5. 6 Benzer koşullarda üretilen matris alaşımı ve kompozitlerin çeşitli koşullardaki Vickers sertlik değerleri	61
Tablo 5. 7 Teorik ve deneysel yoğunluk değerleri	61

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 (a) Direkt sıkıştırılmış döküm, (b) İndirekt sıkıştırılmış döküm	6
Şekil 2. 2 Doğrudan sıkıştırılmış döküm işleminin türlerini gösteren diyagram; (a) Metal hareketi olmaksızın (b) Metal hareketi ile gerçekleşen sıkıştırılmış döküm	7
Şekil 2. 3 Sıkıştırılmış döküm düzeneği	10
Şekil 2. 4 Al/Si faz diyagramında hızlı soğumanın ve basınç uygulamasının etkisi.....	18
Şekil 2. 5 LM24 Al-Si alaşımının dökülmüş yapılarını gösteren optik mikro fotoğraflar: (a) sıkıştırılmış döküm LM24 (b) geleneksel yöntemle dökülmüş LM24	20
Şekil 2. 6 Monolitik A357' nin mikroyapısı (a) gravite kalıp dökümü (b) 100 MPa' da sıkıştırılmış dökümü	21
Şekil 3. 1 1-doğrultusunda yüklenen eleman	32
Şekil 3. 2 E_1' in fiber hacim oranı ile değişimi	33
Şekil 3. 3 Fiber takviyeli kompozitte yük paylaşımı	34
Şekil 3. 4 2-Doğrultusunda yüklenen eleman	34
Şekil 3. 5 Fiber hacim oranı ile E_2' nin değişimi	36
Şekil 3. 6 Fiber takviyeli kompozitte deformasyon paylaşımı	37
Şekil 3. 7 1-Doğrultusunda yüklenen eleman	38
Şekil 3. 8 Fiber hacim oranı V_f ile Poisson oranı ν_{12}' nin değişimi	39
Şekil 3. 9 Kayma yüklemesi yapılan eleman	39
Şekil 3. 10 Fiber hacim oranı V_f ile G_{12}' nin değişimi	41
Şekil 3. 11 Fiber takviyeli kompozit malzemenin deformasyon aşamaları	42
Şekil 3. 12 Fiberler ve matris için şematik gerilim-uzama eğrileri	43

Şekil 3. 13	Fiber hacim oranına karşılık kompozit çekme dayanımı	45
Şekil 4. 1	Sıkıştırılmış döküm deney düzeneği	47
Şekil 4. 2	Çekme deneyi numunesinin boyutları	50
Şekil 4. 3	Iosipescu deneyi numunesinin boyutları	51
Şekil 4. 4	30° lik çekme deneyi numunesinin boyutları	51
Şekil 4. 5	Basma deneyi numunesinin boyutları	51
Şekil 5. 1	Takviyesiz matris malzemesinin yük-uzama grafiği	55
Şekil 5. 2	Çift yönlü kompozit malzemesinin yük-uzama grafiği	55
Şekil 5. 3	Tek yönlü kompozit malzemesinin yük-uzama grafiği	56
Şekil 5. 4	Normal koşullardaki çelik fiberlerin yük-uzama grafiği	56
Şekil 5. 5	600 °C' de 1 h tutulmuş durumdaki çelik fiberlerin yük-uzama grafiği	57
Şekil 5. 6	Tek yönlü kompozit malzemesinin basma yük-şekil değiştirme grafiği	59
Şekil 5. 7	Takviyesiz matris malzemelerin mikroyapıları	63
Şekil 5. 8	Çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (a ve b)	63
Şekil 5. 8	Çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (c)	64
Şekil 5. 9	Tek yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (a ve b)	64
Şekil 5. 9	Tek yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (c)	65
Şekil 5. 10	250 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (a ve b)	65
Şekil 5. 10	250 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (c)	66
Şekil 5. 11	350 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (a ve b)	66
Şekil 5. 11	350 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (c)	67
Şekil 5. 12	450 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (a ve b)	67
Şekil 5. 12	450 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (c)	68
Şekil 5. 13	Çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin	

kırık yüzeyleri	69
Şekil 5. 14 Tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin kırık yüzeyleri (a ve b)	69
Şekil 5. 14 Tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin kırık yüzeyleri (c, d ve e)	70
Şekil 6. 1 Paslanmaz çelik tel takviyeli alüminyum matris kompozitlerinin çekme dayanımlarının fiber hacim oranı ile değişimi	74
Şekil 6. 2 Çelik takviye ve A357 matrisinin arayüzey bölgesindeki mikroyapıları (a) Kalıp ön ısıtma sıcaklığı 480 °C ve basınç öncesi gecikme süresi 70 s, basınç 100 MPa (b) Kalıp ön ısıtma sıcaklığı 290 °C ve basınç öncesi gecikme süresi 18 s, basınç 100 MPa	77



BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Giriş

Metal matris kompozitleri (MMK) kendilerine özgü yüksek dayanım ve elastiklikleri, boyutsal kararlılıkları, yüksek aşınma ve yorulma dirençleri, yüksek termal iletkenlikleri ve yüksek sıcaklıkta kararlılıkları ile son yıllarda çok büyük bir ilgi çekmektedir (Badini et al., 2000; Lianxi, 1995). Özellikle üretim yöntemlerindeki gelişme ile ekonomik olarak çekici ve yüksek mikroyapısal kalitede malzemelerin imal edilmesi olanaklı hale gelmiştir (Clyne & Mason, 1987).

Sıkıştırılmış döküm, önemli oranda artırılmış mekanik özellikleri, büzülme ve gaz gözenekliliklerinin giderilmesi ile tamamlanan, kusursuz yüzey bitimi ve tekrar kullanılabilirlik avantajlarıyla metal matris kompozitler için en yaygın üretim yöntemidir (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Kang et al., 1993; Papworth & Fox, 1996). Son zamanlarda, bilgisayar destekli tasarım, değişik alanlarda kullanılan özgün mekanik özelliklere sahip takviyeli (katkılı) metal matris kompozit döküm parçalarının üretimini olanaklı hale getirmiştir. Böylece, sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen takviyeli metal matris kompozitler, düşük maliyetli ve iyi performansla sahip parçaların üretimi için yüksek bir potansiyele sahiptir. Ancak eriyik, takviye ve kalıp sıcaklıkları, uygulanan basınç ve basınç uygulamasından önceki gecikme, takviye geometrisi ile malzeme kalitesi gibi işlem parametrelerinin dikkatli kontrolü gerekmektedir (Kang et al., 1993). Sıkıştırılmış döküm işlemi aynı zamanda yüksek performansın gerekli olduğu parçaların kritik yerlerine yerleştirilen fiber ön şekillerine de izin verir (Yue & Chadwick, 1996).

Sürekli metalik fiber takviyeli alüminyum bazlı matris kompozitleri, özellikle iyi işlenebilirlik, fiber hacim oranının seçimi konusunda geniş bir esneklik, yüksek

dayanım ve elastiklik, yüksek sürünme ve aşınma direnci ve düşük termal genleşmelerinden dolayı oldukça çekicidir. Bu iyi özelliklerine rağmen, metal matris kompozitler düşük şekil değiştirme ve kırılma toklukları nedeniyle yapısal uygulamaları sınırlanmıştır (Boland et al., 1998; Nam et al., 2000).

Otomotiv, havacılık, spor, eğlence araçları uygulamalarında ve diğer pazarlarda metal matris kompozitlerinin yıllık %12-15' lik büyüme oranları, sıkıştırılmış döküm gibi gelişmiş üretim yöntemlerinin daha iyi kullanımının açık bir göstergesidir (Ghomashchi & Vikhrov, 2000).

Bu çalışmada sıkıştırılmış döküm yöntemi ile takviyesiz alüminyum alaşımının, çift ve tek yönlü çelik fiber takviyeli alüminyum kompozit malzemelerinin üretimleri yapılarak, mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmış, mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

BÖLÜM II

SIKIŞTIRILMIŞ DÖKÜM

2.1 Giriş

Döküm, işlenmemiş malzemelerin kullanılabilir parçalara dönüştürülmesinin en kolay yoludur. Bununla birlikte, geleneksel döküm teknikleri veya yüksek basınçlı kalıp dökümü gibi daha gelişmiş döküm tekniklerinin başlıca sakıncası, gözeneklilik gibi kusurların oluşumudur. Daha da önemlisi, sıcak yırtılmalar, segregasyon kusurları ve bant oluşumu dökülmüş parçaların çalışması esnasında potansiyel çatlak başlangıçları olabilirler. Bu nedenle, bu kusurları gidermek için yeni döküm teknikleri geliştirilmiştir. Çok sayıda kullanılabilir döküm tekniğinden biri olan sıkıştırılmış döküm, daha az kusurlu döküm parçaları yaratmak için daha büyük bir potansiyele sahiptir (Ghomashchi & Vikhrov, 2000).

Sıkıştırılmış döküm, katılaştırmanın tekrar kullanılabilir bir kalıp içinde yüksek basınç altında tamamlandığı bir üretim tekniğidir (Bhagat, 1988; Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Yue & Chadwick 1996). Temelde, erimiş metalin uygulanan hidrostatik basınç altında katılaştığı, kalıp dövme ile kalıcı kalıp dökümü birleştiren bir metal şekillendirme işlemidir (Ghomashchi & Vikhrov, 2000). Bu yüksek basınç, geleneksel döküm uygulamalarında erişilen eriyik basınçlarından daha yüksek büyüklüklerde dir. Sonuç olarak, yeni başlamış büzülme gözeneklerinin içine sıcak noktalardan eriyik beslemesi çok kolay bir şekilde sağlanır. Uygulanan yüksek basınç, aynı zamanda eriyik içine gazların girmesini engeller ve hızlı ısı akışı ve ince mikroyapı için döküm ile kalıp arasındaki teması artırır (Rajagopal, 1981). Sıkıştırılmış döküm terimi, “basınç kriticalleşmesi”, “sıvı preslenmesi”, “ekstrüzyon dökümü”, “sıvı metal dövme işlemi” ve “sıkıştırma şekillendirmesi” gibi bir çok eşanlam kazanmıştır (Bhagat, 1988; Ghomashchi & Vikhrov, 2000).

Sıkıştırılmış döküm, temel olarak hafif ve düşük erime noktalı alüminyum ve magnezyum alaşımlarına uygulanırken, bir çok durumda bakır alaşımlarına, dökme demirlere ve çeliklere de uygulanmaktadır. Sıkıştırılmış döküm işlemi, özellikle kompozitler alanında gelişmiş malzemelerin üretimi için yeni fırsatlar sağlamıştır. Sıkıştırılmış döküm ile üretilmiş metal matris kompozitlerine ilişkin çok sayıda yayım bulunmaktadır. Sıkıştırılmış döküm aynı zamanda bi-metallerin üretimi için de kullanılmaktadır, burada örneğin dökme demir takviyeleri alüminyum alaşımlarında aşınma direncini arttırmak için dahil edilmektedir. Uygulamaları; jantlar, pistonlar ve fren diskleridir (Ghomashchi & Vikhrov, 2000).

Ayrıca sıkıştırılmış dökümde geri çekilebilir kenar maçaları kullanılarak boylu boyunca boşluklar yapmak da olasıdır (Ghomashchi & Vikhrov, 2000).

2.2 Tarihçe

Sıkıştırılmış döküm fikri ilk olarak 1878 yılında D. K. Chernov tarafından önerildi. Bu fikre göre katılaşma olurken erimiş metale buhar basıncı uygulanacaktı (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Rajagopal, 1981). Bununla birlikte, 1937 yılına kadar bu teknik kullanılmamıştır, bu tarihte pirinç ve bronz silindirlerinin üretimi için sıkıştırılmış döküm tekniği ilk olarak kullanılmıştır. Bu tarihten itibaren özellikle Sovyetler Birliği'nde bu alanda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Yüzyıllık eski bir buluş olmasına rağmen, sıkıştırılmış dökümün ticarileşmesi ancak 1970'li yıllarda mümkün olabirmiştir (Bhagat, 1988; Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Rajagopal, 1981).

Plyatskii tarafından verilen rapora göre 1965'te dökme demir, çelik ve çeşitli demir dışı alaşımları kullanarak 200'ün üzerinde farklı çeşit sıkıştırılmış döküm parça üreten 150'den fazla fabrika bulunmaktadır. Bu konuda Amerika'daki en erken çalışma 1960 yılında Birleşik Devletler Hava Kuvvetleri'nin desteklediği bir araştırma projesi üzerinde Reiss ve Kron tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada A356 alüminyum alaşımının mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerinde katılaşma basıncının, döküm sıcaklığının ve düzenek sıcaklığının etkileri araştırılmıştır.

Plyatskii' nin sıkıştırılmış döküm üzerine yazdığı ders kitabı, gelecek araştırmaların alacağı yönü belirtmesi açısından önemlidir. Bu kitap, işlemin üstünlüklerinin ve sınırlamalarının, endüstriyel uygulamalarının, ekipman ve düzenek gereksinimlerinin taslağını çıkarmıştır ve Sovyetler Birliği dışında sıkıştırılmış döküme hız kazandıran bir kuvvet olarak ortaya çıkmıştır.

1979 yılında, Toyota Motor Company (Japonya) sıkıştırılmış döküm üzerine sekiz yıldır süren araştırmalarını tamamlamıştır. Bu çalışma ile binek otomobiller için sıkıştırılmış döküm alüminyum alaşım jantları geliştirilmiştir. Bu gelişme Keneko ve arkadaşları tarafından bu uygulama için çeşitli üretim düşüncelerini de kapsayan bir çalışma olarak sunulmuştur. McGuire tarafından verilen rapora göre ABD' de Gould Inc. tarafından yapılan geliştirme çalışması, sıkıştırılmış dökümün dayanıklı alüminyum pistonları için ümit verici yeni bir üretim yöntemi olduğunu göstermiştir (Rajagopal, 1981).

Dünyanın her yerinde bu net veya net şekle yakın üretim tekniğinin kullanımı ve geliştirilmesi ile ilgilenen araştırma merkezleri vardır. Çeşitli mühendislik ve bilimsel dergilerde başlıca alüminyum ve magnezyum bazlı metal matris kompozitlerle ilgili 700' den fazla yayın bulunmaktadır (Ghomashchi & Vikhrov, 2000).

Bu ilerlemelerle birlikte, sıkıştırılmış döküm teknolojisinin daha fazla gelişmesi ve uygulama sahasının artması ile daha belirgin bir ilerleme görülecektir (Rajagopal, 1981). Halen geniş bir araştırmacı grubu tarafından, Hindistan, Japonya, İngiltere ve ABD gibi ülkelerde sıkıştırılmış döküm tekniği üzerinde çalışılmaktadır (Bhagat, 1988; Yue & Chadwick, 1996).

2.3 İşlem Sırası

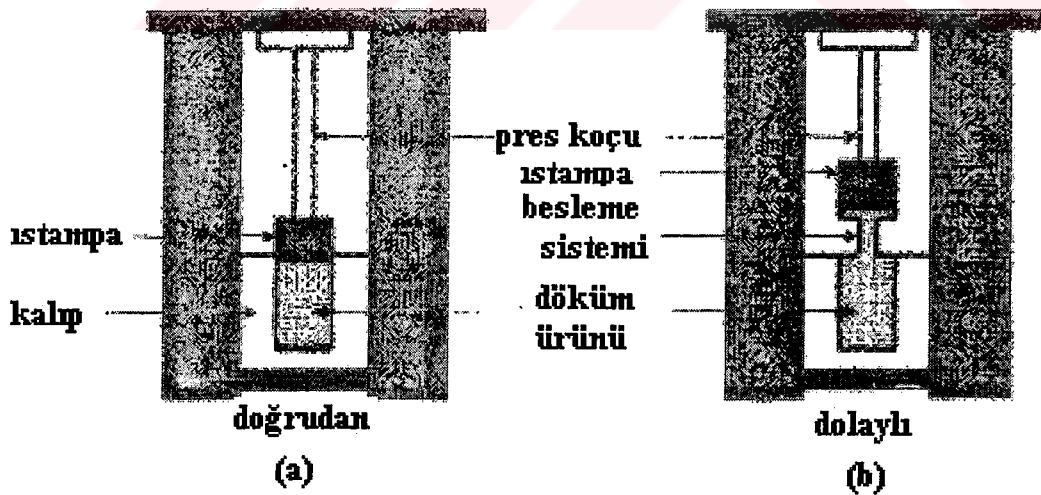
Sıkıştırılmış döküm için temel olarak işlem sırası şu şekildedir:

1. Önceden belirlenmiş miktarda iş malzemesinin ergitilmesi, düzeneğin bütün temas yüzeylerinin yağlanması ve düzeneğin ön ısıtılması.

2. Doğrudan veya besleme yolundan geçerek kalıp boşluğu içine sıvı metalin boşaltılması.
3. Kalıbın kapatılması ve katılaşma tamamlanana kadar basınç uygulanması. Bu işlem hem ısı akış hızını artırır hem de makro/mikro büzülme gözenekliliğini azaltır. Çünkü gaz gözenekliliğinin çekirdeklenmesi basınç bağımlıdır ve gözenek oluşumu erimiş metal içinde tutulan erimiş gazlara bağlıdır.
4. Dökümün çıkarılması, düzeneğin temizlenmesi ve ocağın yeniden şarj edilmesi (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Rajagopal, 1981).

2.4 Sıkıştırılmış Dökümün Sınıflandırılması

Sıkıştırılmış döküm işlemi, basıncın doğrudan erkek kalıptan (ıstampa) geçerek, katılaşan döküm ürünü üzerine uygulanması veya uygulanan basıncın orta seviyedeki bir besleme sistemi üzerinden katılaşan döküme uygulanmasına bağlı olarak başlıca iki temel gruba ayrılabilir (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Rajagopal, 1981). Doğrudan sıkıştırılmış döküm ve dolaylı sıkıştırılmış döküm olarak adlandırılan bu iki durum Şekil 2.1’de şematik olarak gösterilmiştir.

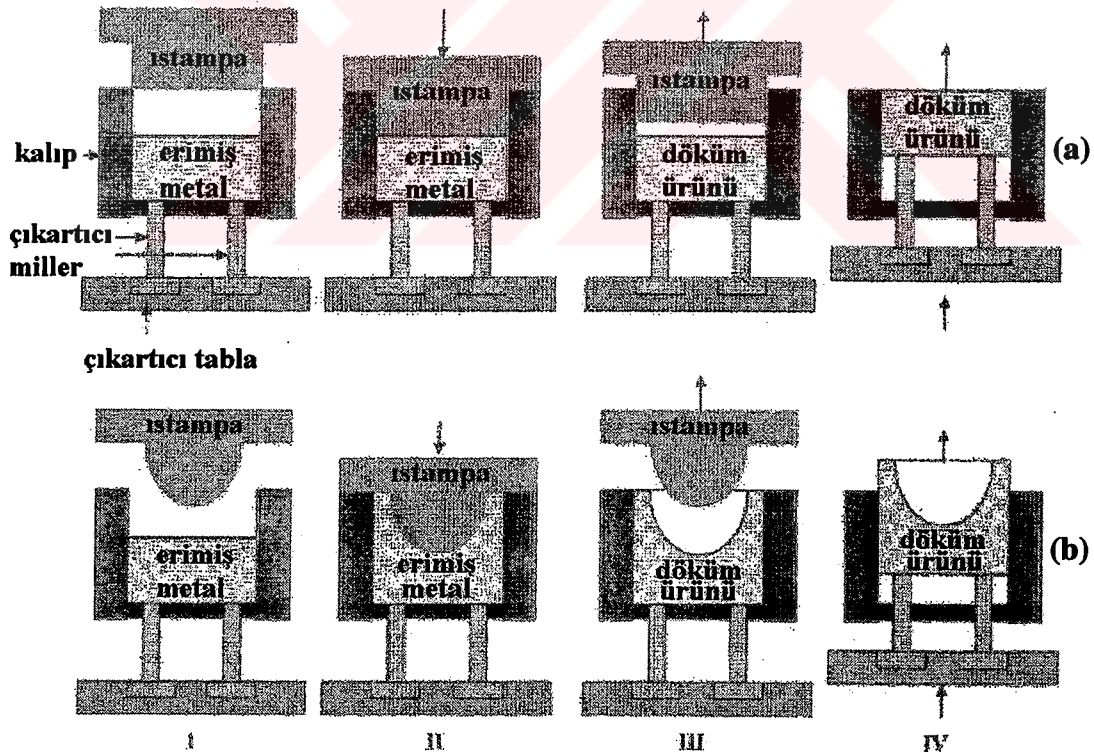


Şekil 2. 1 (a) Doğrudan sıkıştırılmış döküm, (b) Dolaylı sıkıştırılmış döküm
(Ghomashchi & Vikhrov, 2000)

Doğrudan sıkıştırılmış döküm de kendi içinde, ıstampa hareketi ile başlatılan sıvı metal yer değişikliğine bağlı olarak ilave iki forma ayrılabilir; metal hareketi

olmaksızın ve metal hareketi ile doğrudan sıkıştırılmış döküm. Şekil 2.2' de şematik olarak gösterilen bu durumlardan, metal hareketinin olmadığı birinci form özellikle ingot tipi parçalar için uygun iken, aynı zamanda geriye doğru işlem olarak da bilinen metal hareketini içeren ikinci form, daha kullanışlıdır ve şekil verilmiş parçaların yaygın olarak dökümleri için elverişlidir.

İlk olarak geliştirilen doğrudan sıkıştırılmış döküm, pistonlar, masterlar ve ana silindirler gibi basit ve simetrik dökümleri üretmek için kullanılır. Doğrudan sıkıştırılmış dökümün kullanımı işlemin ve kalıp tasarımının özelliklerine bağlı olarak çok sınırlıdır: maksimum döküm ağırlığı genellikle 10 kg' dan fazla olamamaktadır. Metal hareketi ile doğrudan sıkıştırılmış döküm, otomobil endüstrisi için alaşım jantları gibi karışık olarak şekillendirilmiş dökümlerin üretimini kolaylaştırdığından endüstriyel gereksinimler için daha uygundur.



Şekil 2. 2 Doğrudan sıkıştırılmış döküm işleminin türlerini gösteren diyagram; (a) Metal hareketi olmaksızın (b) Metal hareketi ile gerçekleşen sıkıştırılmış döküm (Ghomashchi & Vikhrov, 2000)

Doğrudan sıkıştırılmış döküm düzenekleri basit ve açıktır. Dolaylı sıkıştırılmış döküm düzenekleri genellikle şu kategorilere ayrılır: (i) düşey kalıp kapanması ve sıvı metale kuvvet uygulanarak içeri atılması, (ii) yatay kalıp kapanması ve sıvı metale kuvvet uygulanarak içeri atılması, (iii) yatay kalıp kapanması ve düşey olarak sıvı metale kuvvet uygulanarak içeri atılması, (iv) düşey kalıp kapanması ve yatay olarak sıvı metale kuvvet uygulanarak içeri atılması.

Dolaylı sıkıştırılmış döküm makinalarının gelişimi temel olarak sıkıştırılmış döküm işleminin uygulanmasını da geliştirmiştir. Pratik olarak iç hataların olmadığı alaşım jantları gibi karmaşık dökümlerin üretimine olanak sağlamaktadır. Kalıp kaplaması gerekli değildir ve 100 MPa' ın üzerinde bir metal basıncı katılma boyunca uygulanır. Maksimum döküm boyutu makina kapasitesi tarafından sınırlanır. Bununla birlikte, dolaylı sıkıştırılmış döküm işleminin sakıncası 4 mm' den daha az bir duvar kalınlığı ile ince kesitlerin dökümü için yeterli olmamaktadır. Bunun nedeni düşük doldurma hızları ve erimiş metalin hızla katılmasındır. Bundan başka, dökümün dışarı çıkarılmasının zor olduğu döküm ürünlerinin şekil karmaşıklığı üzerinde bazı sınırlamalar vardır. Geleneksel kalıp döküme göre dolaylı sıkıştırılmış dökümün daha düşük kalıp sıcaklığı, ince tane yapılı daha fazla soğuma hızı sağlar. Dolaylı sıkıştırılmış döküm ürünleri, tane yönlenmesi ile karakterize edilen dövme işleminden daha homojen yapıdadır.

Sıkıştırılmış döküm erimiş alaşımın preslenmesi olarak kabul edilse bile, aynı zamanda yarı katıların şekillendirilmesi için de kullanılabilir. Buna göre yeni bir sınıflandırma şu şekilde yapılabilir: (i) kristalizasyonun başlamasından önce, (ii) yarı katı presleme olarak da tanımlanabilen kristalizasyonun başlamasından sonra, yapılan sıkıştırılmış döküm (Ghomashchi & Vikhrov, 2000).

2.5 Döküm Kalitesini Etkileyen Faktörler

Önem sırasına göre döküm kalitesini etkileyen faktörler şunlardır:

2.5.1 Alaşım

Döküm kalitesini etkileyen en önemli faktör alaşımın kendisidir. Alaşımın kompozisyonu ve erime sıcaklığı, ısıl iletkenliği, ısı transfer katsayısı ve kalıp malzemesi üzerine yapışması gibi fiziksel özellikleri kalıp ömrü üzerine doğrudan etkilerinden dolayı son derece önemlidir. Daha önemlisi, alaşımın cinsi döküm parametrelerinin, örneğin kalıp ömrü üzerine doğrudan etkisi olan kalıp sıcaklığının belirlenmesinde esas teşkil ederler. Bu nedenle sıkıştırılmış döküm genellikle alüminyum ve magnezyumun düşük erime sıcaklığına sahip olan alaşımları için kullanılmaktadır (Ghomashchi & Vikhrov, 2000).

2.5.2 Eriyik Kalitesi ve Miktarı

Oksit miktarına bağlı olarak eriyik kalitesi sıkıştırılmış dökümde diğer döküm yöntemlerinden daha fazla önem taşır. Bunun nedeni, metalin dökülmesi sırasında kalıbın içinde kalan cürufları gidermek için gerekli olan yolluk ve girişlerin bulunmamasıdır. Hem demir hem de demir dışı alaşımları için oksit seviyesi, cüruf oluşturma, sıyırma ve/veya filtreleme işlemlerinin bir kombinasyonu ile yapılabildiği kadar en aza indirilmelidir.

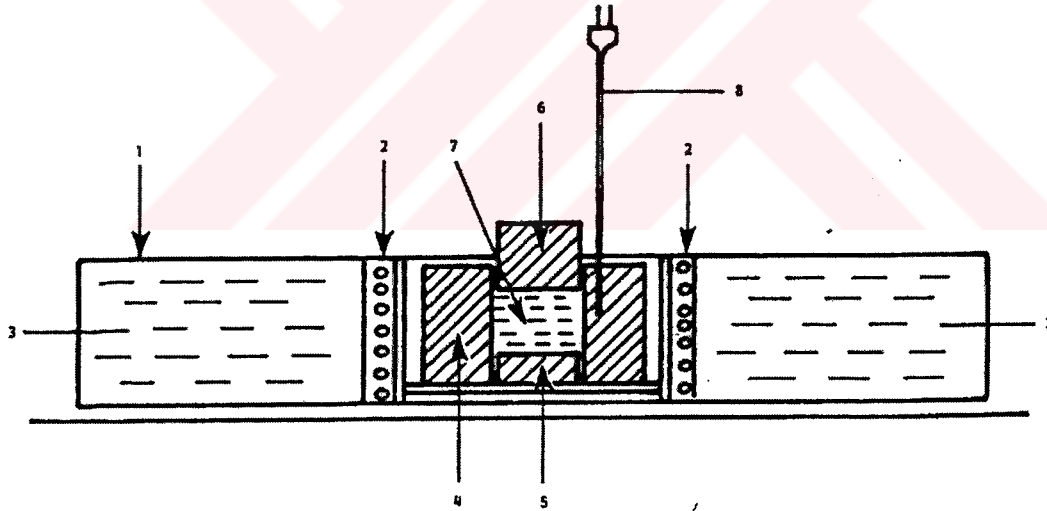
Diğer taraftan, sıkıştırılmış dökümde absorblanan gaz döküm kalitesi için daha az öneme sahiptir. Çünkü uygulanan basınç seviyesi gazların hem oluşumu hem de eriyik içinde tutulmasını önlemek için yeterince yüksek seçilir. Bunun yanında, gaz absorpsiyonu eriyik sıcaklığının uygulanabildiği kadar en alt seviyede tutulması ile en aza indirilebilir. Uzun gaz giderme işlemleri gereksizdir, çünkü gaz boşlukları yeterli basınçla kolaylıkla giderilir. Gaz giderme işlemi genelde yalnızca ince kesitlerin varlığının yüksek döküm sıcaklığını zorunlu hale getirdiği ve aşırı gaz girişinin söz konusu olduğu durumlarda gereklidir.

Eriyik miktarı, net şekillerle çalışıldığı durumlarda önemlidir. Son ölçülerin kontrolü, döküm ağırlığı veya hacmi ölçülerek yapılabilir. Eriyiğin ölçülmesi, genelde yalnızca geniş çaplı hafif ağırlıklı parçalar için uygulanır. Geçerli olan

yöntem, aşırı metal dökmek ve aşırı metali ya kalıbın dışına ya da dökümün kritik olmayan bir bölgesine uzaklaştırmak ve sonradan temizlemektir (Rajagopal, 1981).

2.5.3 Düzenek

Sıkıştırılmış dökümün düzeneği dövme işleminde, kalıp dökümde veya kalıcı kalıp dökümde kullanılanlardan daha basit yapıdadır. Bu nedenle madeni eşya gereksinimi diğer yöntemlere göre daha azdır. Sıkıştırılmış döküm düzeneğinin başlıca elemanları; ıstampa (erkek parça), kalıp, dökümü dışarı çıkaran mil ve kalıbı ön ısıtmaya yarayan ısıtıcıdır. Şekil 2.3' de bir sıkıştırılmış döküm düzeneği ve elemanları gösterilmiştir. Ekipman, kullanım için bir hidrolik prese monte edilir. Bu hidrolik pres, parça geometrisine ve basınç ihtiyacına bağlı olarak tek etkili veya çift etkili olabilmektedir (Rajagopal, 1981).



Şekil 2.3 Sıkıştırılmış döküm düzeneği: (1) ocak gövdesi, (2) ısıtıcı eleman, (3) ocak izolasyonu, (4) çelik kalıp, (5) alt ıstampa, (6) üst ıstampa, (7) erimiş metal, (8) termokupul (Bhagat, 1988)

Sıkıştırılmış döküm kalıpları sürekli olarak termal yorulma, çatlama, erzyon, korozyon ve çentik etkisine sebep olabilen termal ve mekanik çevrim yüklemelerine maruzdur. Bu nedenle kalıbın malzemesi, tasarımı, üretim yöntemi, uygun ısıl işlemi ve bakımı çok önemlidir. Kalıp malzemesi yüksek sıcaklıkta iyi sertliğe, yüksek

temper direncine, yeterli tokluğa, özellikle yüksek derecede temizliğe ve düzenli mikroyapıya sahip olmalıdır (Ghomashchi & Vikhrov, 2000). Alüminyum alaşımlarının ve daha bir çok demir dışı alaşımların sıkıştırılmış dökümleri için kalıp malzemesi olarak genellikle H13 (ASTM 2344) ticari krom-molibdenli sıcak iş kalıp çeliği kullanılır (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Rajagopal, 1981). Demir esaslı malzemelerin uygulamalarında H13 kalıp çeliği temel olarak küçük büyüklükteki deneysel işler için kullanılabilir, çünkü H13 ile yapılmış kalıbın ömrü bu uygulamalar için sınırlıdır. Sonuç olarak yüksek sıcaklıkta erimiş çelikle temas eden kalıbın tungsten-bazlı veya molibden-bazlı malzemeleri içermesi gerekir (Rajagopal, 1981).

Düzenegin, erkek detaylarındaki köşe radyüsleri genellikle demir dışı malzemelerde 2 mm ve demir alaşımlarında 3 mm seçilir. Dökümü çıkartmayı kolaylaştırmak için çekme açıları kalıbın dış duvarlarından 0.5° ve ıstampa yüzeyinden ve katılaşmadan sonraki daralmaya bağlı olarak kalıp detaylarından $1-2^\circ$ açıyla seçilir. Çekme açılarının uygun seçimi aynı zamanda uygulanan minimum basınç ile gözenekliliği azaltmak için gerekli uygun katılma modeli sağlayabilir (Rajagopal, 1981).

2.5.4 Döküm Sıcaklığı

Kalıp boşluğu içine erimiş metalin döküldüğü sıcaklık hem döküm kalitesi hem de kalıp ömrü açısından son derece önemlidir. Çok düşük döküm sıcaklığı kalıbın doldurulması sırasında yetersiz akışkanlığa neden olur. Bunun sonucunda kalıbın doldurulması tamamlanamaz ve döküm yüzeyinde soğuk katlanma hataları oluşur. Diğer taraftan, çok yüksek döküm sıcaklığı, sıvı metalin düzenegin ara yüzeylerinin içine doğru ekstrüzyonuna sebep olabilir, aynı zamanda sıkıştırılmış dökümün kalın kesitlerinde büzülme gözenekliliğine sebep olabilir. Tüm bunların yanında kalıp ömrü de yüksek döküm sıcaklığından etkilenir.

İdeal döküm sıcaklığı, alaşımın liküdüs sıcaklığı ve donma aralığının (liküdüs ile solidüs arasındaki fark) her ikisine birden bağlıdır. Genel olarak, liküdüsün üzerinde

gerekli olan aşırı ısıtma dar bir donma aralığı sergileyen alaşımlar için daha yüksektir. Bu tür alaşımlar kalıp duvarları üzerinde kabuk oluşumuna çok fazla eğilimlidir ve düşük iç kalite ile yüzey süreksizlikleri tarafından eşlik edilirler. Alüminyum alaşımları için, döküm sıcaklığı genellikle, liküdis sıcaklığının 10-100 °C üzerinde seçilir. Alt limit, 7075 ve A390 alüminyum alaşımları gibi geniş donma aralığına sahip alaşımlarda uygulanabilir. Üst limit, dar donma aralığına sahip 3003 ve A413 alüminyum alaşımlarına uygulanabilir. İnce kesitli parçalar ve düzensiz profiller aynı zamanda, kalıbın doldurulmasını artırmak için daha yüksek döküm sıcaklığını gerektirmektedir. Bakır bazlı alaşımlar ve çelikler için, gerekli aşırı ısıtma, genellikle 30-150 °C arasındadır. Çünkü bu alaşımlar, metal kalıp ile temasta çok hızlı bir şekilde katılaşmaktadır (Rajagopal, 1981).

2.5.5 Düzenek Sıcaklığı

Kalıp boşluğu ve ıstampa sıcaklıkları 200-300 °C arasında tutulur (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Rajagopal, 1981). 150 °C' nin altındaki düşük sıcaklıklar, kalıplarda termal yorulma hatalarını ve aynı zamanda döküm yüzeyi üzerinde soğuk katlanmaları başlatır. 400 °C' nin üzerindeki çok yüksek düzenek sıcaklıkları, sıcak noktalardan ve döküm içinde büzülme gözeneklerine sebep olabilir. Temel olarak demir bazlı alaşımların sıkıştırılmış dökümü için kalıbın aşırı ısıtılması ile ortaya çıkan diğer bir sorun ise, döküm ve kalıp arasında büyük bir kaynaklanma eğiliminin oluşumudur. Üretim şartları altında, birbirini izleyen dökümler arasında kalıplardan ısı çıkışı için kalıp malzemesinin çevresi yeterli olmalıdır ve gerekli yerlerde seçilen su soğutması veya buhar soğutması ile arttırılmalıdır (Rajagopal, 1981).

2.5.6 Basınç Uygulamasından Önceki Bekleme Zamanı

Optimum sonuçlar basıncın erimiş metale sıfır akışkanlık sıcaklığının yakınında uygulandığı zaman bulunur. Sıfır akışkanlık sıcaklığı, sıvı metalin akış özelliklerini kaybettiği sıcaklığın altındaki sıcaklık olarak tanımlanır. Bu sıcaklık genellikle, alaşımın solidüs ve liküdis sıcaklıkları arasındaki mesafenin orta noktasıdır. Bununla birlikte, ergimiş metalin liküdis sıcaklığında veya altında kalıp içine dökülmesi

kullanışlı değildir. Netice olarak, daha önce tanımlandığı gibi, eriyik aşırı ısıtılmış şartlarda dökülür ve liküdü sıcaklığının altına soğumasına izin verildikten sonra basınç uygulanır. Alüminyum alaşımlarında, kalıp kapanması ve basınç uygulanmasından önce 10-20 saniye arasında bekleme sağlamak çoğunlukla yeterli olmaktadır.

Bununla birlikte, çelik döküm durumlarında metal optimum presleme sıcaklığına kalıpla ergimiş metal arasındaki yüksek sıcaklık farkı sebebiyle çok hızlı bir şekilde ulaşır. Planlanmış bir bekleme, 60 mm kalınlığın üzerindeki kalın kesitli döküm durumlarının dışında nadiren gereklidir (Rajagopal, 1981).

2.5.7 Yağlama

Isı transferi ve katılma hızını kontrol etmek için kullanılan ticari olarak ayırıcı malzemeler, yarı sıvı metalin ters akışı ile basınç altındaki düzende kalıba belli orana kadar tutunabilmesinden sıkıştırılmış dökümde kullanılamazlar. Dökümler arasında sıcak kalıpların üzerine kolloidal grafitin ince bir tabaka oluşturacak şekilde püskürtülmesi, demir dışı ve dökme demir uygulamalarının bir çoğu için tatmin edici sonuçlar vermektedir. Ticari grafit dövme yağlayıcıları genel olarak yeterlidir (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Rajagopal, 1981).

Çelik dökümleri için, ergimiş çelik ile temas eden kalıp yüzeylerine sıcakken ayırıcı etkiye sahip seramik yağlayıcılar püskürtülebilir. Bunlar, sıvı bir ortam içinde bir bağlayıcı ve alumina tozunun karışımı şeklinde ticari olarak kullanılmaktadır. Bu tabakanın kalıp yüzeyleri üzerindeki sürekliliği, sıkıştırılmış çelik döküm ile kalıp arasındaki difüzyonun azaltılmasında önemli bir etkidir (Rajagopal, 1981).

Bütün uygulamalar için, kalıpların havada 350 °C' ye ısıtılarak ön işleme tabi tutulması istenir. Böylece aşınma ve kaynaklanmayı engelleyen koruyucu bir oksit tabakası oluşmaktadır (Rajagopal, 1981).

2.5.8 Basınç Seviyesi ve Süresi

Demir ve demir dışı malzemelerin çoğunluğunda büzülme gözeneklerinin ve gaz boşluklarının oluşumunu engellemek için 70-105 MPa arasında bir basınç seviyesi yeterlidir. M.R. Ghomashchi & A. Vikrov' a göre, uygulanması gereken basınç miktarı 50-150 MPa arasında değişir (Ghomashchi & Vikhrov, 2000). Bununla birlikte bazı durumlarda dökümün geometrisi, sık sık kalıbın doldurulması ve gözenek kontrolü için daha yüksek basınç kullanılmasını zorunlu kılmaktadır.

Dökümün katılaştıran son parçası, genellikle gözeneklik olayının en hassas olduğu alandır. Gözenekliğin azaltılması, sıvı veya yarı-sıvı metalin katı yapı örgüsüyle "ayrılma-beslemesi" yapılmasıyla olur. Katı bölgeyi tamamiyle ayıran bu metal akışı olduğu zaman (genellikle en son katılaştıran bölgenin hemen yakınında oluşur) katılaştıran bölgedeki kabuğa basınç uygulamak için bu bölgede belli bir plastik deformasyon olmak zorundadır. Dökümün en son katılaştıran parçasında 70 MPa' lık bir basınç seviyesine erişmek için gerekli, pres kuvvetinin dökümün kesit alanına bölünmesi ile tanımlanan nominal basınç, sıkıştırılmış dökümün geometrisine bağlı olarak bu seviyede iki kere oluşmalıdır.

Kusursuz döküm sağlayan minimum basınç seviyesinin üzerinde artan basınç seviyesinin, küçük ek yararlar sağladığı bulunmuştur. Aynı zamanda dökümün akma dayanımını aşan çok yüksek basınçların tane incilmesi ve daha yüksek özellikler sağladığı bilinmektedir. Bu ek yararlar, daha yüksek pres kapasitesi gereksinimi ile yüksek basınç ve yüksek sıcaklığın kombinasyonuna bağlı olarak ortaya çıkan artan maliyetlerle karşılaştırılmalıdır. Bununla birlikte, sıkıştırılmış döküm içerisindeki büzülme ve gaz boşluklarının tüm eğilimlerini ortadan kaldırmak için yeterli bir çevre basıncından yararlanılır. Bu basınç, genellikle basit şekiller için 70-105 MPa arasında olan basınç seviyesinde, ince ve karmaşık şekillerde ise 140-210 MPa arasındadır.

Dökümün şekli ve kesit kalınlığı, sıkıştırma basıncı altında katılaştıranın tamamlanmasını sağlamak için gerekli basınç süresini belirlemektedir. Minimum

gerekli sürenin ötesinde, daha uzun bekleme süresi küçük yararlar sağlar ve aslında duvar çatlamlarına ve rijit ıstampa üzerindeki dökümün termal daralmasına bağlı olarak ıstampa'nın geri çekilmesinin zorlaşmasına sebep olabilir. Kural olarak basıncın maksimum süresi, yaklaşık olarak 1 mm' lik kesit kalınlığı için 1 s' dir (Rajagopal, 1981).

2.6 Sıkıştırılmış Dökümün Üstünlükleri ve Sakıncaları

Sıkıştırılmış döküm tekniği geleneksel döküm yöntemleri ve deformasyon işlemleri üzerine başlıca şu üstünlüklere sahiptir:

1. Daha yüksek mekanik özellikler. Akma dayanımları %10-15 ve yüzde uzamaları ile yorulma dayanımları %50-80' e kadar arttırılır.
2. Yüksek sıcaklıklarda ısıl kararlılık.
3. Daha ince mikroyapı.
4. Geleneksel döküm işlemlerine göre segregasyonun en aza indirilmesi, porozitenin engellenmesi.
5. Net veya net şekle yakın üretim sağlaması ile karmaşık şekillerin ve ince detayların üretilmesi (net şekil kapasitesi). 100 mm' de 0.25 mm – 500 mm' de 0.6 mm ölçüsel doğruluk sağlaması.
6. Isıl işlem görebilme.
7. Kaynaklanabilme kabiliyeti.
8. Kusursuz yüzey bitirme.
9. Yüksek verimlilik. Dövmenin tersine daha az enerji gereksinimi, basit hareket işlemiyle üretim sağlaması ve geri dönüş için hemen hemen hiç hurda olmaması. Ayrıca döküm işlemine göre daha yüksek üretim hızı sağlaması.
10. Sıcak veya soğuk dövme işlemlerinden daha az basınç gereksinimi ile ekipman ve kalıp malzemesi ihtiyacının azaltılması. Herhangi bir besleme sistemi, yolluk, girişler, büzülme giderici birimler, besleyiciler olmadan tamamlanabilmesi.
11. Kompozit üretimine uygulanabilmesi ve özel alaşımların dökülebilmesi. Demir dışı ve demir alaşım kompozisyonlarının bir çok çeşidinin (hem döküm

hem de dövme) kullanılmasına imkan vermesi (Bhagat, 1988; Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Kang et al., 1993; Lianxi et al., 1995; Lim & Nishida 1995; Rajagopal, 1981; Skalianos et al., 1997; Yue, 1997; Yue & Chadwick, 1996).

Sıkıştırılmış dökümün sakıncaları şu şekilde sıralanabilir:

1. Yüksek maliyet (başlıca hidrolik pres ve kalıbın ön ısıtılması için gerekli ısıtıcı sistem).
2. Kalıp ömrünün kısalması.
3. Karmaşık şekilli parçaların üretiminin sınırlanması.
4. İnce kesitlerin üretim zorluğu.
5. Sınırlanmış maksimum boyut ve ağırlık. Çubuk, boru ve plaka üretimi için uygun değildir.
6. Kalıp boşluğu içinde türbülanslı akışa bağlı olarak ortaya çıkan kusurlar.
7. Katılaşma sırasında oluşan dentritik yapıya bağlı olarak homojen olmayan mekanik özellikler (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Rajagopal, 1981; Lianxi et al., 1995; Lim & Clegg, 1997; Kang et al., 1998).

2.7 Kuramsal İnceleme

Katılaşma sırasında basınç uygulamasının bir alaşım sisteminde faz ilişkilerini etkilemesi beklenir. Bu ilişki için Clausius-Clapeyron denklemi göz önüne alınarak mantıksal bir sonuç çıkarılabilir;

$$\frac{\Delta T_f}{\Delta P} = \frac{T_f (V_l - V_s)}{\Delta H_f} \quad (2.1)$$

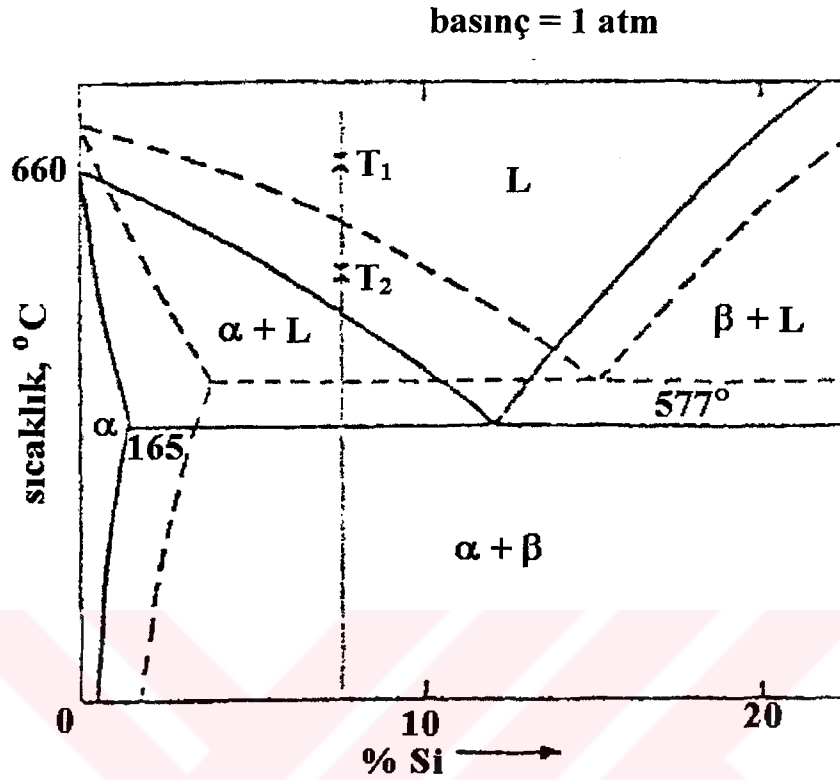
burada, T_f denge donma sıcaklığı, V_l ve V_s sırasıyla sıvı ve katının özel hacimleri ve ΔH_f katıdan sıvıya erime için gerekli ısı miktarıdır (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Yue & Chadwick, 1996). Hacmin yerine geçen uygun termodinamik denklem (sıvı metal ideal bir gaz olarak göz önüne alınır), donma noktası üzerine basıncın etkisi kaba olarak şu şekilde hesaplanır:

$$P = P_0 \exp \left(\frac{-\Delta H_f}{RT_f} \right) \quad (2.2)$$

burada, P_0 çevre basıncı ve R ideal gaz sabitidir. Böylece, T_f artan basınç ile artmaktadır. Donma sıcaklığında böyle bir değişimin artan basınç ile atomlar arası mesafede azalmaya bağlı olduğu ve böylece erime/donma için önceden gerekli olan atomik hareketin sınırlandığı kabul edilmektedir. Aynı zamanda, bileşiği meydana getiren elementlerin, empüritelerin ve az miktardaki elementlerin çözünebilirliğinin basınçla artması beklenilmektedir.

Yukarıda bahsedilen kuramsal ifadelerin, deneysel olarak liküdü sıcaklığının 9 °C üzerinde yaklaşık 150 MPa basınçta saf Al/Si ikili alaşımları için arttığı ispat edilmiştir. Bundan başka Şekil 2.4' te görüldüğü gibi, ötektik noktası sağa, yani daha yüksek Si miktarına kayar. Faz diyagramındaki bu değişikliklerin sonucunda, sıkıştırılmış döküm ile üretilmiş parçaların mikroyapısında ve mekanik özelliklerinde önemli artışlar görülür.

Sıkıştırılmış döküm parçalarında tane incelmesinin sebebini açıklayan iki önemli ve birbirine zıt mekanizma söz konusudur. Bunlardan birincisinde Chadwick ve Yue, basıncın tane incemesi üzerinde etkiye sahip olmadığını, sıkıştırılmış dökümlerin gözlenen ince taneli yapısının temel olarak ısı-transferi katsayısındaki artışa bağlı olduğunu, yani katılaştıran alaşım için daha büyük soğuma oranlarının alaşım ve kalıp duvarları arasındaki hava aralığında azalmaya böylece daha fazla etkili temas alanına bağlı olduğunu iddia etmektedirler. Diğer mekanizmada ise Franklin ve arkadaşları, basınç uygulamasının başlangıç olarak aşırı ısıtılmış alaşımda alt soğumaya sebep olduğu (Şekil 2.4) ve böylece çekirdeklenme sıklığının arttığını bunun da daha ince boyutta tanelere sebep olduğunu ileri sürmektedir.



Şekil 2. 4 Al/Si faz diyagramında hızlı soğumanın ve basınç uygulamasının etkisi (Ghomashchi & Vikhrov, 2000)

Aslında her iki hipotezde doğrudur ve geçerli durumdadır. Ancak bu hipotezlerden biri katılaşmanın her anında diğerine hakim olabilir. İnce yapı için bu iki temel özellik, katılaşan alaşım ile kalıp duvarı arasındaki hava tabakasının kalınlığı ve alt soğumanın derecesi, basınç, basıncın gecikme zamanı ve uygulama süresi ile katılaşan metalin bileşimi gibi işlem parametrelerine bağlıdır. Basınç uygulaması kesinlikle katılaşan metal ile metalik kalıp arasındaki hava boşluğunu azaltır ve böylece temas alanını artırır; ısı-transferi katsayısının artışı etkiler, ancak bu başlıca mekanizma olmayabilir. Sıkıştırılmış döküm sırasında ergimiş metalin akış ve ısı-transferi karakteristiklerini göstermek için sayısal modelleme kullanan Gethin ve arkadaşları tarafından tamamlanmış çalışmada da bu yönde bulgular elde edilmiştir. Bu çalışmada uygulanan basınç ile ergimiş metalin termo-fiziksel özelliklerinde küçük değişiklikler olduğu bildirilmektedir.

Basınç uygulamasının zamanlaması kritiktir; basınç sıcaklık $T > T_m + \Delta T$ ' deyen uygulanırsa, basınç farkına (ΔT) bağılı olarak T_m ' de beklenen artış olmaktadır. Bu durumda alt soğumanın etkisi göz ardı edilebilir ve böylece ısı-transferi katsayısındaki artış hakim mekanizma olur. Bununla beraber, sıcaklık $T_m \leq T \leq T_m + \Delta T$ ' deyen basınç uygulanırsa, alt soğuma hakim mekanizma olabilir. Alt soğumanın etkisi, basınç eğer çekirdeklenmenin başında uygulanırsa, yani sıcaklık $T < T_m$ ' de iken, hala önem taşır.

Tane incelmesinden sorumlu mekanizma ne olursa olsun hesaba katılmadan, saf Al, Al-Li, Al-Li-Zr, Al-Li-Zr-Ti-B, Al-Li-Cu-Zr, Al-Cu, Al-Si alaşımları üzerindeki incelemeler artan basınç ile sıkıştırılmış döküm parçalarının mekanik özelliklerinin arttığını göstermiştir. Örneğin, Balan ve arkadaşları LM6 Al-Si alaşımı üzerine uygulanan basıncın (1-75 MPa) etkisi üzerinde çalışmışlar ve artan uygulama basıncıyla yaklaşık olarak, yoğunlukta %3.4, çekme dayanımında %63, yüzde uzamada %2.6 ve sertlikte %50 artış elde etmişlerdir. Bu şekilde olağan üstü artışlar temel olarak primer α fazının inceliğiyle mikroyapısal değişikliğe ve silisyum fazının modifikasyonuna bağlıdır. Benzer sonuçlar saf alüminyum için de bulunmuştur.

Genel olarak, sıkıştırılmış döküm parçaların ince yapı ve daha yüksek mekanik özellikler göstermesi şu faktörlere bağlıdır:

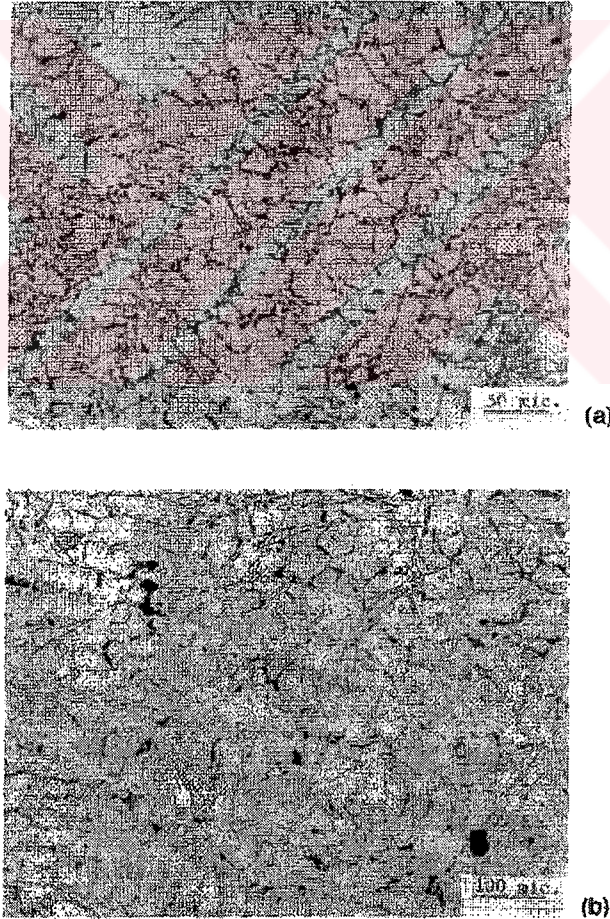
1. Ergimiş metalin alt soğuma değişimi.
2. Katılaşılan alaşımın kompozisyonu ve oluşan fazların oranlarındaki değişim.
3. Metalik kalıp ile katılaşılan alaşım arasındaki ısı-transferi katsayısındaki değişim.
4. Gözenekliğin azalmasına bağlı olarak alaşımın yoğunluğundaki değişim (Ghomashchi & Vikhrov, 2000).

2.8 Sıkıştırılmış Döküm Malzemelerin Mikroyapısı

Daha önce bahsedildiği gibi, sıkıştırılmış döküm ürünler diğer döküm parçalarına göre daha yüksek yoğunluğa, daha ince tane boyutuna ve daha homojen mikroyapıya

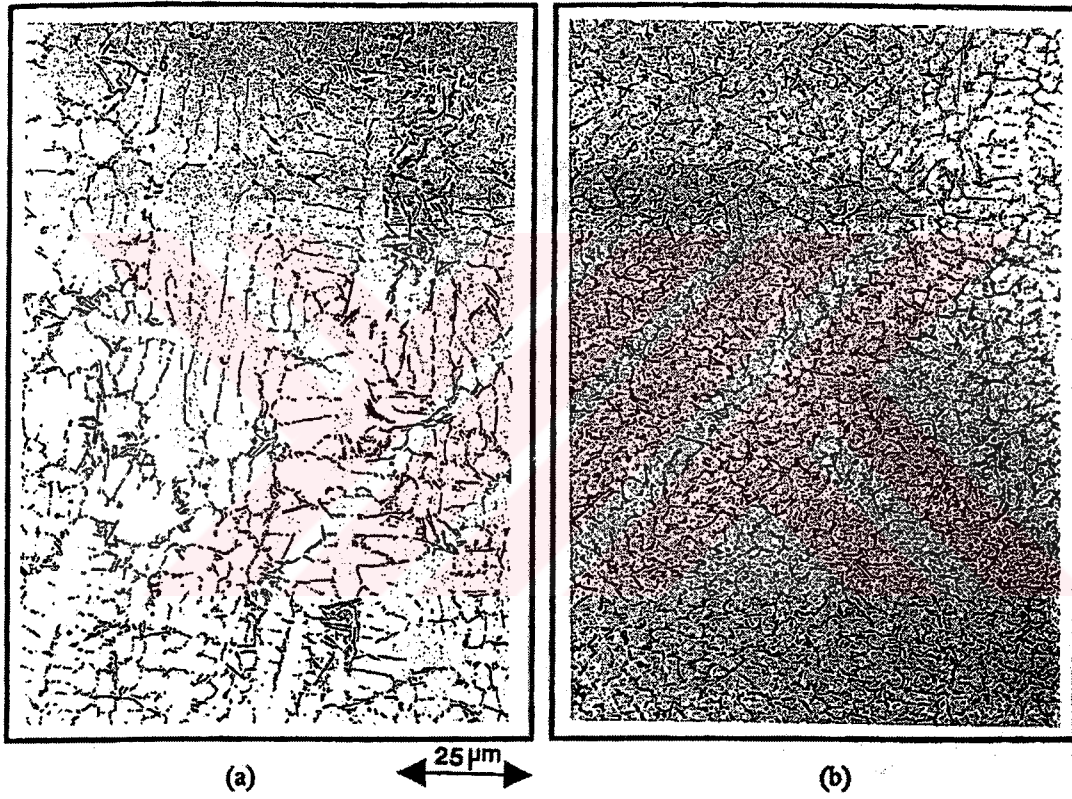
bağlı olarak daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir (Skalianos et al., 1997; Yue, 1997; Bhagat, 1988; Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Yue & Chadwick 1996).

Basınç uygulaması sıkıştırılmış döküm alaşımlarında fazların morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir, örneğin artan basınç ile lamel grafitler ince taneli grafitlere dönüşme eğilimindedir, ayrıca Al-Si alaşımlarında ipliksi silikon olması muhtemel morfolojilerdendir. LM24 Al-Si alaşımlarının tipik bir sıkıştırılmış döküm mikroyapısı, silikon morfolojisi ve tane yapısı bakımından büyük farklılıklara sahip geleneksel döküm parçaları ile birlikte Şekil 2.5' te gösterilmiştir. Bu nedenle, sıkıştırılmış döküm ürünlerinin daha yüksek mekanik özelliklere sahip olacağı beklenilmektedir (Ghomashchi & Vikhrov, 2000).



Şekil 2. 5 LM24 Al-Si döküm alaşımının yapılarını gösteren optik mikro fotoğraflar: (a) sıkıştırılmış döküm LM24 (b) geleneksel yöntemle dökülmüş LM24 (Ghomashchi & Vikhrov, 2000)

Şekil 2.6'da ise gravite döküm ve 100 MPa' da sıkıştırılmış monolitik A357' nin mikroyapıları görülmektedir. Gravite dökümünde, dentritler arasında yer alan Al/Si ötektik ve geniş primer α Al dentritleri içeren mikroyapı oluşur. Sıkıştırılmış döküm de benzer bir mikroyapı üretir, ancak ısının dışarı çıkış hızının artması ve artan alt soğuma ve katılaşma hızına bağlı olarak şu olaylar gelişir: (1) dentrit yapısının incelmesi, (2) alüminyum dentritlerinin artan hacim oranı ve (3) ötektik düşen hacim oranı (Kang et al., 1993).



Şekil 2. 6 Monolitik A357' nin mikroyapısı (a) gravite kalıp dökümü (b) 100 MPa' da sıkıştırılmış döküm (Kang et al., 1993)

BÖLÜM III

KOMPOZİT MALZEMELER

3.1 Giriş

Kompozit malzeme terimi, iki veya daha fazla malzemenin makroskobik ölçüde birleşerek kullanılabilir yeni bir malzeme meydana getirmesini anlatır. İyi tasarlanmış, kompozit bir malzeme kendini meydana getiren malzemelerin en iyi özelliklerini göstermektedir. Gelişen malzeme özellikleri; dayanım, elastiklik, korozyon direnci, aşınma direnci, ağırlık, yorulma ömrü, sıcaklığa bağlı davranış, termal izolasyon, termal iletkenlik, akustik izolasyondur. Doğal olarak bu özelliklerin hepsi birden aynı anda geliştirilemez hem de geliştirilmesi istenen bir durum değildir. Hatta bu özelliklerden bazıları artarken bazıları da azalabilir. Amaç mümkün olduğu kadar tasarım işleminin gerçekleşmesini sağlayacak özelliklerde malzeme üretmektir (Jones, 1999).

3.2 Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler genel olarak dört farklı kategoriye ayrılırlar (Jones, 1999):

- 1- Sürekli fiber takviyeli kompozit malzemeler.
- 2- Çeşitli malzeme tabakalarından oluşan tabakalı kompozit malzemeler.
- 3- Süreksiz tane (partikül) takviyeli kompozit malzemeler.
- 4- Yukarıdaki üç değişik tipin çeşitli kombinasyonları.

Bu sınıflandırmalardan konumuzla ilgili olan sürekli fiber takviyeli kompozit malzemeleri biraz daha ayrıntılı olarak incelenecek, diğerlerinin genel özelliklerinden bahsedilecektir.

3.2.1 Sürekli Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler

Çeşitli şekillerdeki uzun fiberler, aynı malzemelerin hacim (bulk) formlarından doğal olarak daha elastik ve daha dayanıklıdır. Örneğin, cam levha 20 MPa gerilimde kırılırken, cam fiberlerin ticari olarak elde edilebilecek dayanımları 2800-4800 MPa, laboratuvar koşullarındaki dayanımları 7000 MPa'dır. Fiberin geometrisi ve fiziksel düzeni, dayanımının değerlendirilmesinde önemli bir noktadır ve yapısal uygulamalarda göz önüne alınmalıdır. Daha doğrusu, bir fiberin hacim formundan farklı özelliklere sahip olma durumu, fiberin daha iyi yapısından kaynaklanmaktadır. Fiberlerde, kristaller fiber eksenine boyunca uzatılır. Üstelik, fiberlerde hacim formundaki malzemelerden daha az iç hata bulunmaktadır. Örneğin, malzemenin sahip olduğu dislokasyonlar fiber formlarında hacim formlarından daha azdır (Jones, 1999).

3.2.1.1 Fiberlerin Özellikleri

Fiber geometrik olarak yalnızca uzunluğunun çapa oranı çok yüksek olarak değil aynı zamanda yakın kristal çapı büyüklüklerine göre tanımlanır. Bazı seçilmiş fiber malzemelerin dayanımları ve elastiklikleri artan ortalama S/ρ ve E/ρ 'ya göre Tablo 3.1' de düzenlenmiştir. Alüminyum, titanyum, ve çelik gibi genel yapısal malzemeler karşılaştırma amacı ile verilmiştir. Bununla birlikte, fiberler kullanıma hazır olan bir matrise sahip olmaları nedeniyle, fiberler ile yapısal metaller arasında doğrusal bir karşılaştırma doğru değildir. Dayanımın yoğunluğa ve elastikliğin yoğunluğa oranlarının fiberin etkisinin göstergesi olarak genel bir şekilde kullanılması özellikle ağırlığın hassas olduğu uygulamalardaki (örneğin uçak ve uzay araçları gibi) metaller için listelenmiştir (Jones, 1999).

Tablo 3.1 Fiber ve tel özellikleri (Jones, 1999)

Fiber veya Tel	Yoğunluk ρ (kN/m ³)	Çekme Dayanımı S (GN/m ²)	S/ ρ (km)	Çekme Elastisite Modülü E (GN/m ²)	E/ ρ (Mm)
Aluminyum	26.3	.62	24	73	2.8
Titanyum	46.1	1.9	41	115	2.5
Çelik	76.6	4.1	54	217	2.7
E-Cam	25.0	3.4	136	72	2.9
S-Cam	24.4	4.8	197	86	3.5
Karbon	13.8	1.7	123	190	14
Berilyum	18.2	1.7	93	300	16
Bar	25.2	3.4	137	400	16
Grafit	13.8	1.7	123	250	18

3.2.1.2 Whiskerlerin Özellikleri

Whisker temel olarak fiberdeki gibi hemen hemen aynı kristal çapı büyüklüğüne sahiptir, fakat genel olarak whisker çok kısa ve kalındır, aynı zamanda uzunluğun çapa oranı daha azdır. Böylece, whisker kristal-hacim-malzeme farklılığı paradoksunun daha açık örneğini gösterir. Bu da whiskerin fibere göre daha iyi ve daha yüksek özelliklere sahip olduğunu gösterir. Whiskerler kristallerin hemen hemen kusursuz dizilmesiyle sonuçlanan küçük ölçeklerdeki kristalleşme ile elde edilir. Demir gibi malzemeler 20 GPa'lık teorik dayanımlı kristal yapılarına sahip olup, ticari olarak kullanılabilir yapısal çelikler 570-690 MPa arasında dayanıma sahiptir. Teorik ve gerçek dayanım arasındaki farklılık çeliğin kristal yapısındaki kusurlar sebebiyledir. Bu kusurlar dislokasyonlar olarak anılır ve düktil malzemelerde kolaylıkla hareket ederler. Dislokasyonların hareketi kristaller arası ilişkiyi ve böylece malzemenin dayanım ve elastikliğini değiştirir. Hemen hemen kusursuz bir whisker, çok az dislokasyon gösterir. Böylece demirin whiskerleri önemli ölçüde hacim formundaki çelikten daha yüksek dayanımlara sahiptir. Whiskerlerin özellikleri Tablo 3.2' de üç metalle birlikte verilmiştir. Fiberlerdeki

gibi whiskerler de yalnız başlarına kullanılamaz, sonuç olarak whiskerler ve metaller arasında doğrudan bir karşılaştırma anlamlı değildir (Jones, 1999).

Tablo 3.2 Whisker özellikleri (Jones, 1999)

Whisker	Yoğunluk ρ (kN/m ³)	Teorik Dayanımı S_T (GN/m ²)	Deneysel Dayanım S_E (GN/m ²)	S_E/ρ (km)	Çekme Elastisite Modülü E (GN/m ²)	E/ ρ (Mm)
Bakır	87.4	12	3.0	34	124	1.4
Nikel	87.9	21	3.9	44	215	2.5
Demir	76.8	20	13	170	200	2.6
B ₄ C	24.7	45	6.7	270	450	18
SiC	31.2	83	11	350	840	27
Al ₂ O ₃	38.8	41	19	470	410	11
C	16.3	98	21	1300	980	60

3.2.1.3 Matris Malzemelerinin Özellikleri

Doğal olarak fiberler ve whiskerler, yükü taşıyabilen yapısal elementin şeklini almak için bir araya gelmedikçe kullanımları azdır. Bağlayıcı malzeme genellikle matris olarak tanımlanır. Matrisin fiberleri veya whiskerleri desteklemek, fiberleri veya whiskerleri korumak, kırılan fiberler ve whiskerler arasında gerilim geçişi sağlamak gibi görevleri vardır. Genel olarak matris malzemeler, fiberlerden veya whiskerlerden oldukça düşük yoğunluğa, elastikliğe ve dayanıma sahiptir. Bununla birlikte, fiberlerin veya whiskerlerin matris ile birleşmesiyle oluşan kompozitler yüksek dayanım ve elastikliğe sahip olmasına rağmen hala düşük yoğunluğa sahiptir. Matris malzemeleri polimerler, metaller, seramikler veya karbon olabilir. Metaller dahil matris malzemelerin difüzyon bağlanması veya ısıtma ve vakumla sızma işlemleri ile fiber sistemlerde yerinde akışı sağlanır (Jones, 1999).

3.2.2 Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, birbirlerine bağlanmış olan en az iki farklı malzeme katmanından oluşur. Tabakalaşma, daha kullanışlı bir malzemeye ulaşmak için bileşiği oluşturan katmanlar ve bağlanan malzemelerin en iyi durumlarını birleştirir. Tabakalaşma ile dayanım, elastiklik, ağırlık, korozyon dayanımı, aşınma direnci, termal izolasyon, akustik izolasyon gibi özellikler geliştirilmektedir. Tabakalı kompozit malzemeler; bimetaller, kaplama yapılmış metaller, tabakalı cam, plastik-bazlı tabakalar ve tabakalı fiberli kompozitleridir (Jones, 1999).

3.2.3 Süreksiz Tane (Partikül) Takviyeli Kompozit Malzemeler

Süreksiz tane (partikül) takviyeli kompozit malzemeler, bir veya daha fazla malzemelerin partiküllerinin başka bir malzemenin matrisi içine ilavesi ile oluşur. Partiküller ve matrisin metalik veya nonmetalik olabildiği dört farklı durum söz konusudur. Nonmetalik matris içinde nonmetalik partiküller, nonmetalik matris içinde metalik partiküller, metalik matris içinde metalik partiküller, metalik matris içinde nonmetalik partiküller (Jones, 1999).

3.2.4 Kompozit Malzemelerin Kombinasyonları

Çok sayıda çok fazlı kompozit malzemeler fiberli, tabakalı veya partiküllü kompozit malzemelerin birden fazla karakteristiğini birlikte gösterir. Örneğin takviyeli beton hem partiküllü (beton çimento-pasta bağı içinde kumdan ibarettir) hem de fiberlidir (çelik takviyelerden dolayı). Aynı zamanda, tabakalı fiber takviyeli kompozit malzemeler açıkça hem tabakalı hem de fiberli kompozit malzemelerdir.

Tabakalı fiber takviyeli kompozit malzemeler, hem fiberli kompozit malzemeler hem de tabakalaşma tekniklerini içeren kompozit malzemelerinin melez bir sınıfıdır. Burada, fiber takviyeli malzemelerin katmanları, çeşitli yönlerdeki tabakaların farklı dayanımlar ve elastiklikler vermesi için farklı yönlerde düzenlenmiş her katmanın fiber yönüyle birlikte bağlanır. Böylece, tabakalı fiber takviyeli kompozit

malzemelerin dayanımları ve elastiklikleri gerçekleştirilmiş yapısal faktörlerin tasarım gereksinimlerine uydurulabilir. Tabakalı fiber takviyeli kompozit malzemelerin örnekleri, roket motor kasaları, teknenin dış kısmı, uçak kanat panelleri ve gövde kısımları, tenis racketleri, golf çubuğu gibi yapısal elemanları içerir (Jones, 1999).

3.3 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemelerin Üstünlükleri

3.3.1 Dayanım ve Elastiklik Üstünlükleri

Fiber takviyeli kompozit malzemelerin üstünlükleri göz önüne alındığında akla gelen ilk ve en önemli üstünlüğü yüksek dayanım ve elastikliğe sahip olmalarıdır. Genellikle dayanım ve elastiklik özellikleri diğer malzemelerle karşılaştırma sırasında kullanılmaz, bunların yerine bu büyüklüklerin yoğunluğa bölümlerinden oluşan bağıl değerleri kullanılır. Dayanımın yoğunluğa ve elastikliğin yoğunluğa bölümleri, özgül dayanım ve özgül modül ve ya özgül elastiklik olarak anılan basit ifadelerdir. Örneğin, kompozit malzemeler yüksek dayanımlı çelik ile aynı dayanım ve elastikliğe sahipken %70 daha hafif yapılabilir. Diğer gelişmiş kompozit malzemeler alüminyuma göre üç kat daha fazla dayanıklı iken yalnızca %60 ağırlığa sahiptir. Bu özellikler ağırlığın öne çıktığı yapılarda örneğin havacılık ve uzay araçlarında önemlidir ve bu alanda hızlı bir gelişme göstermiştir (Jones, 1999).

3.3.2 Maliyet Üstünlükleri

Yapısal tasarımda göz önünde bulundurulması gereken en önemli nokta her zaman maliyettir. Kompozit malzemelerin özgül dayanımları ve özgül modülleri geleneksel yapısal malzemelerle karşılaştırıldığında çok yüksek olduğundan kompozit malzemelerin maliyet üstünlüğü genel olarak ağırlığın hassas olduğu uygulamalarda iyi durumdadır. Bu da, kompozit malzemelerin ağırlığın önemli olduğu yapılarda özellikle etkili olduğunu göstermektedir. Gelişmiş kompozit yapılar için kompozit malzemelerin maliyet üstünlükleri, imalat metalleri için mevcut olan üstünlüklere göre daha fazladır. Genel olarak, tüm maliyet üstünlükleri veya maliyet

karşılaştırmaları ham kompozit malzemelerinin ve kompozit parçalarının artan üretim hızı ve kompozit malzemelerinin üretimi için gelişen yeni teknolojilerin kompozit yapılarının maliyetini düşüreceği açıkça görülmektedir (Jones, 1999).

3.3.3 Ağırlık Üstünlükleri

Genel olarak, havacılık ve uzay araçlarında ağırlığın azalmasıyla motorun itme kuvveti, kanat alanı ve yakıt sarfiyatı azaltılabilir. Örneğin, savaş uçakları için bir parçadaki 0.45 kg'lık bir azalma, toplam ağırlıkta 1.13 kg'lık bir düşmeye neden olmaktadır. Uzay araçları için toplam ağırlıktaki düşme daha fazladır (Jones, 1999).

3.4 Kompozit Malzemelerin Uygulamaları

Askeri havacılık alanındaki uygulamaları:

- 1- General Dynamics F-111 savaş uçaklarının kanat-merkez uyum sistemlerinde bor-epoksi,
- 2- Vaught A-7 bombardıman uçaklarının frenleme sistemlerinde grafit-epoksi,
- 3- Vought S-3A denizaltı arama uçaklarının tesisatlarında grafit-epoksili bal peteği göbeği,
- 4- Boeing F-18 saldırı uçaklarının düşey kuyukları, kanatları ve yatay kuyruk yüzeyleri gibi temel yapıları ile çeşitli küçük kapıları ve uçak çevresindeki diğer küçük bölgeler gibi ikincil yapılarında grafit-epoksi,
- 5- Boeing AV-8B Harrier uçaklarında grafit-epoksi,
- 6- Grumman X-29 A uçaklarının ileri eğilmiş kanatlarında,
- 7- Northrop Grumman B-2 gizli bombardıman uçaklarının radar-absorpsiyonu karakteristiklerini sağlayan tüm dış parçalarında,
- 8- Lockheed Martin F-22 savaş uçaklarının yapısındaki %26'lık bölümde, kullanılmaktadır (Jones, 1999).

Sivil havacılık alanındaki uygulamaları:

- 1- Lockheed L-1011 uçaklarının düşey kuyuklarında grafit-epoksi,
- 2- Rutan Voyager uçaklarının tüm yapısında,

- 3- Boeing 777 uçaklarında karbon-epoksi, cam ve karbonun hibriti ve karbon-karbon,
- 4- İngiliz-Fransız Concorde uçakları ve Sovyet Tupelov T-144 uçakları gibi yüksek hızlı sivil taşıma uçaklarında kullanılmaktadır (Jones, 1999).

Uzay uygulamaları:

Grafit-epoksi kırırleri Hubble Uzay Teleskopunu stabilize etmek ve desteklemek için kullanılmıştır (Jones, 1999).

Otomotiv uygulamaları:

Düşük maliyet ve yüksek hızlı üretim bu malzemelerin otomotiv sektöründe de ilgi görmesine neden olmuştur. Karbon fiberlerin kullanımı ile uygun düşük maliyetli parçaların üretimi sağlanmıştır (Jones, 1999).

Elektronik alanındaki uygulamaları:

Elektronik endüstrisindeki uygulamalar için karbon fiber takviyeli bakır-bazlı kompozit malzemeler çok yüksek ısı iletkenliği ve iyi aşınma direnci gibi yararlı özellikleri ile karakterize edilirler. Elektronik ön-montajları, lazerler ve bilgisayar mühendisliğinde uygulanan kompozit malzemeler geleneksel elektronik malzemelerle karşılaştırıldıklarında daha yüksek sıcaklıklarda ve daha etkili çalışabilirler (Kaczmar et al., 2000).

Ticari uygulamaları:

Fiberglas ürünler; balık oltaları, botlar, tenis raketleri, kayaklar, sörf tahtaları bugün çok popülerdir. Boron-epoksi ve grafit-epoksi golf sopaları ve tenis raketlerinde kullanılmaktadır (Jones, 1999).

3.5 Sıkıştırılmış Dökümün Metal Matris Kompozitlerindeki Yeri

Metal matris kompozitler, matris alaşımlarına göre çok daha iyi fiziksel ve mekaniksel özelliklere sahiptir (Kang et al., 1993). Yüksek dayanımları ve

elastiklikleri, yüksek aşınma ve yorulma dirençleri, ölçüsel kararlılıkları ve yüksek sıcaklıklardaki kararlılıkları ile türbin ve otomobil motorlarında, otomobil pistonları ve valflerinde ve özellikle havacılık alanında uygulama bulmaktadır (Badini et al., 2000). Bununla beraber, metal matris kompozitlerinin özellikleri matris alaşımının ve takviye edilen malzemenin özelliklerine tek başına bağlı değildir, aynı zamanda üretim yöntemine, matrisin mikroyapısına, matris içinde takviye edilen malzemenin dağılımına, takviye edilen faz ve matris arasındaki arayüzey bağlanma şartına da bağlıdır (Bhagat, 1985; Lianxi et al., 1995). Bu sebeple, ekonomik olarak çekici ve yüksek kalitede metal matris kompozitleri elde etmek için üretim yönteminin seçimi çok önemlidir (Bhagat, 1985; Lianxi et al., 1995; Liu et al., 1997). Kullanılan çok sayıda üretim yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; sıkıştırılmış döküm işlemi, vakum-yüksek basınç sızma işlemi ve karıştırmalı döküm işlemidir (Liu et al., 1997).

Oksidasyon problemi, matris içindeki mikro boşluklar, eksik nüfuz etme veya arayüzeylerde bağlanmama hataları gibi kusurların üzerinden gelebilen ve çekici işlem ekonomisi ile iyi mikroyapı kontrolünün bir kombinasyonunu sunabilen sıkıştırılmış döküm whiskerle kısmen takviye edilen karışık parçaların, kısa fiberlerin veya partiküllerin üretimi için özellikle uygundur ve önemli ticari kullanıma sahiptir. Bununla beraber, çubuklar, borular, plakalar ve uzun şekilli takviyeli metal matris kompozitlerinin üretimi için uygun değildir (Lianxi et al., 1995).

Aluminyum, magnezyum, titanyum ve alaşımları gibi düşük yoğunluktaki metaller ve alaşımlar, metal matris kompozitleri için yaygın matrisler oluşturmaktadırlar. Geniş bir çeşitlilik gösteren seramik, bor ve karbon takviyelerin arasına sıvı metalin sızması, bu şekildeki metal matris kompozitlerinin üretimi için yaygın bir yol olmuştur (Lim & Clegg, 1997). Böylece, sıkıştırılmış döküm basınçla sızma işlemini geliştirmek için kullanılmıştır. Bu işlem ile fiber, whisker veya partikül ön-şekilleri pahalı olmayan atılabilir kapların içine yerleştirilerek, ergimiş matris malzemesine gaz basıncı ile kuvvet uygulanır. Ön şekil kap üzerindeki gaz basıncı yarı hidrostatiktir ve dayanım gereksinimi en alt seviyededir. Netice olarak karmaşık şekilli olsalar bile ön şekil kapları kolaylıkla hazırlanır. İşlem özellikle araştırma ve sınırlı üretim için uygundur (Bhagat, 1988).

Net şekle yakın üretim için en kusursuz üretim metodu olan sıkıştırılmış döküm tekniğinde ergimiş metal, fiberlerin çevresine kuvvet-sızması olacaktır (Bhagat, 1988; Lim & Nishida, 1995). Tüm absorplanan ve tutulan gazların uzaklaştırılması sağlanacaktır. Aynı zamanda fiber-matris temas zamanı, ergimiş metalin yüksek basınç altında büyük bir soğuma göstermesinden ve ısı çıkışının yüksek bir hız göstermesinden dolayı oluşan hızlı katılaşma ile önemli miktarda azaltılacaktır (Bhagat, 1988).

Başlangıçta ısıtılmış olan ön şekillerin doğrudan ve dolaylı sıkıştırılmış dökümü yapılır. Doğrudan sıkıştırılmış döküm basit şekilli kompozit parçalarının üretimi için uygulanır, kalıpları basit ve uygun maliyettedir. Dolaylı sıkıştırılmış dökümün uygulanması daha karmaşık kompozit parçaların üretimini olanaklı hale getirir, ancak daha pahalı döküm kalıplarını gerektirmektedir (Kaczmar et al., 2000).

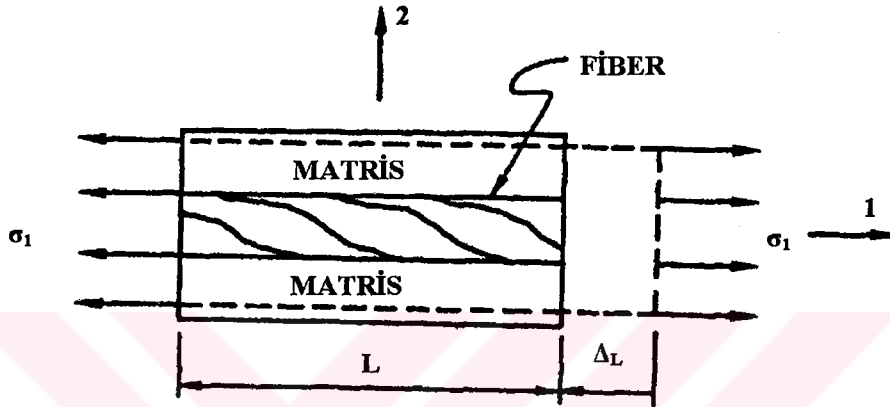
3.6 Kompozit Malzemelerin Mekanikliği

3.6.1 Elastiklik Yaklaşımları

Malzeme mekanikliğine yaklaşımın ana özelliği etkili bir çözüm elde etmek için kompozit malzemenin mekanik davranışı ile ilgili basitleştirici kabuller yapılmasıdır. Her yaklaşım uygun olmalıdır. Mekanikte, yaklaşımlar keyfi olamaz. En önemli yaklaşım tek eksenli fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiber doğrultusundaki uzamalarının matristeki gibi fiberde de aynı olduğudur, Şekil 3.1. Eğer uzamalar aynı değil ise, fiberler ve matris arasında kırılma olduğu ifade edilebilir. Böylece yaklaşım kabul edilebilir bir sebebe sahiptir. Matris ve fiberlerdeki uzamaların aynı olması nedeniyle gerilim uygulamasından önce düzlem olan 1-eksenine normal kesitler, gerilim uygulanması sonrası da düzlem kalırlar. Bahsedilen kiriş, levha ve kabuk teorileri gibi olağan malzemelerin mekanikliğinde önemli bir kabuldür. Bu temelde, tek eksenli fiber takviyeli kompozit malzemelerin ortotropik modülleri için malzemenin mekanik özelliklerini türeteceğiz, yani E_1 , E_2 , ν_{12} ve G_{12} . Her ifade için basitleştirilen yaklaşımlar kesindir (Jones, 1999).

3.6.1.1 E_1 ' in Belirlenmesi

Belirlenen ilk özellik, kompozit malzemenin 1- doğrultusundaki yani fiber doğrultusundaki elastisite modülüdür.



Şekil 3.1 1-doğrultusunda yüklenen eleman (Jones, 1999)

Şekil 3.1' den;

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.1)$$

burada, E_1 temel yaklaşıma göre hem fiberlere hem de matrise uygulanır. Eğer kompoziti meydana getiren malzemelerin her ikisi de elastik olarak davranırsa fiber doğrultusundaki gerilimler;

$$\sigma = E_f \cdot \epsilon_1 \quad \sigma_m = E_m \cdot \epsilon_1 \quad (3.2)$$

dir. σ_1 ortalama gerilimi numunenin A kesiti üzerinde, σ_f fiberlerin A_f kesiti üzerinde ve σ_m matrisin A_m kesiti üzerinde etkilidir. Böylece, kompozit malzeme numunesi üzerinde sonuçlanan kuvvet,

$$P = \sigma_1 \cdot A = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m \quad (3.3)$$

dir. Denklem (3.2)' nin Denklem (3.3)' te yerine konulmasıyla ve makromekanikten,

$$\sigma = E_1 \cdot \epsilon_1 \quad (3.4)$$

kabulü ile açıkça

$$E_1 = E_f \frac{A_f}{A} + E_m \frac{A_m}{A} \quad (3.5)$$

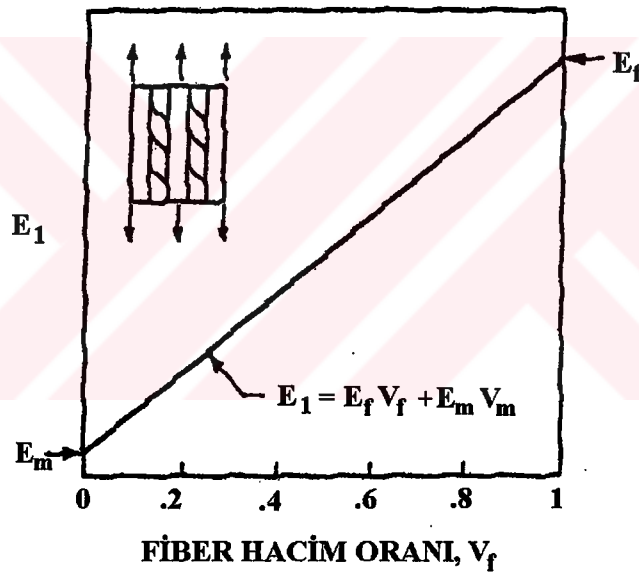
bulunur. Fiberlerin ve matrisin hacim oranları şu şekilde yazılabilir;

$$V_f = \frac{A_f}{A} \quad V_m = \frac{A_m}{A} \quad (3.6)$$

Böylece

$$E_1 = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m \quad (3.7)$$

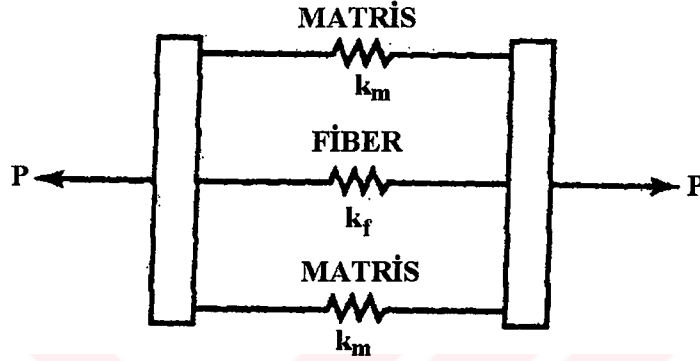
fiber doğrultusundaki kompozit malzemenin elastisite modülü için karışımlar kuralı olarak bilinen denklem bulunur ve grafik olarak Şekil 3.2' de gösterilmektedir.



Şekil 3.2 E_1 ' in fiber hacim oranı ile değişimi (Jones, 1999)

Karışımlar kuralı V_f fiber hacim oranı 0'dan 1'e giderken E_1 elastisite modülünün E_m ' den E_f ' e basit linear değiştiğini göstermektedir. Fiber modülü tipik olarak çok kere matris modülüdür. Böylece 0.6 civarındaki alışılmış pratik fiber hacim oranlarında, fiber modülü E_1 kompozit modülüne hakimdir. E_m ' deki geniş değişimler E_1 üzerinde çok küçük etkiye sahiptir. Böylece E_1 ' in, fiberin özelliğine sahip olduğu söylenebilir.

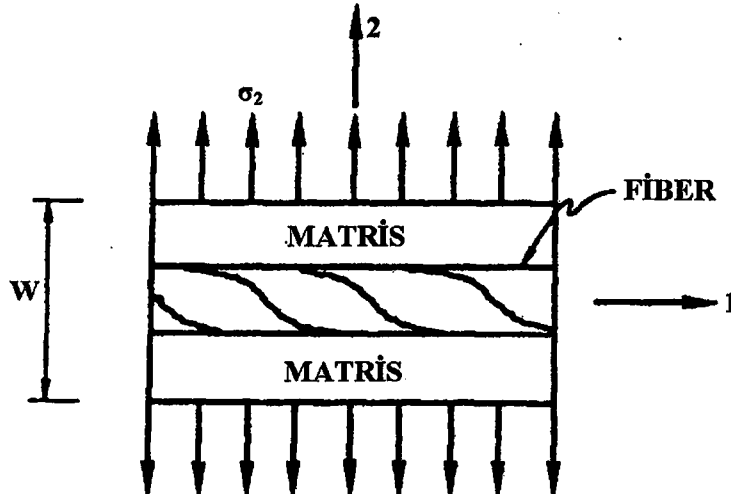
Fiber ve matris arasındaki yük paylaşımı, basit paralel yay modeli olarak Şekil 3.3' te gösterilebilir. Eğer bütün yaylar aynı miktarda deforme edilir (eşit uzama yaklaşımı) ve $k_f \gg k_m$ olursa, fiber yayı uygulanan yükün çoğunu taşımaktadır (Jones, 1999).



Şekil 3.3 Fiber takviyeli kompozitte yük paylaşımı (Jones, 1999)

3.6.1.2 E_2 ' nin Bulunması

Fiberlere dik doğrultuda kompozit malzemenin elastisite modülü E_2 bir sonraki adım olarak ele alınır. Aynı dik doğrultudaki gerilme σ_2 malzemelere mekanik yaklaşımla Şekil 3.4' teki gibi fiber ve matrisin her ikisine birden uygulandığı kabul edilmektedir. Bunun anlamı kompozit malzeme içindeki komşu elementlerin (fiberler ve matris) dengeli olmalarıdır. Bununla birlikte 2-doğrultusunda fiber ve matriste uzamalar üzerine herhangi bir uygun yaklaşım ve öngörü yapılamamaktadır.



Şekil 3.4 2-Doğrultusunda yüklenen eleman (Jones, 1999)

Böylece fiber ve matristeki uzamalar gerilmelerden bulunur:

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad \varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \quad (3.8)$$

Dik doğrultudaki uzunluk üzerine, ortalama olarak, ε_f yaklaşık olarak $V_f W$ oysa ki ε_m yaklaşık $V_m W$ olarak etki etmektedir. Böylece dik doğrultudaki toplam deformasyon;

$$\Delta W = \varepsilon_2 \cdot W = V_f \cdot W \cdot \varepsilon_f + V_m \cdot W \cdot \varepsilon_m \quad (3.9)$$

veya

$$\varepsilon_2 = V_f \cdot \varepsilon_f + V_m \cdot \varepsilon_m \quad (3.10)$$

denklem (3.8)' den uzamaların yerine konulmasıyla

$$\varepsilon_2 = V_f \frac{\sigma_2}{E_f} + V_m \frac{\sigma_2}{E_m} \quad (3.11)$$

olur. Fakat, makroskobik gerilim-uzama ilişkisinden

$$\sigma_2 = E_2 \cdot \varepsilon_2 = E_2 \cdot \left[\frac{V_f \cdot \sigma_2}{E_f} + \frac{V_m \cdot \sigma_2}{E_m} \right] \quad (3.12)$$

bulunur. Bunun üzerine

$$E_2 = \frac{E_f \cdot E_m}{V_m \cdot E_f + V_f \cdot E_m} \quad (3.13)$$

olarak fiberlere dik doğrultuda elastisite modülü için malzemelerin mekanik ifadesi bulunur. Denklem (3.13) şu şekilde boyutsuzlaştırılabilir;

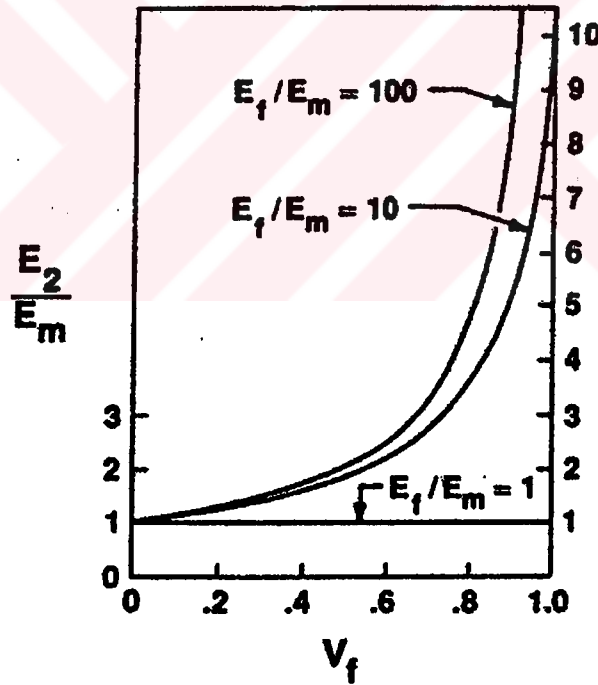
$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{1}{V_m + V_f \cdot (E_m/E_f)} \quad (3.14)$$

E_2/E_m ' in değerleri Tablo 3.3' de fiber modülünün matrisinkine oranının üç değişik değeri için verilmiştir.

Tablo 3.3 Çeşitli E_f/E_m ve V_f değerleri için E_2/E_m değerleri (Jones, 1999)

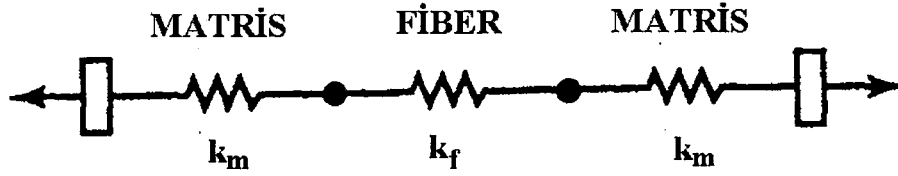
$\frac{E_f}{E_m}$	V_f							
	0	.2	.4	.5	.6	.8	9.	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1.22	1.56	1.82	2.17	3.56	5.26	10
100	1	1.25	1.66	1.98	2.46	4.80	9.17	100

E_2 için ifade edilen sonuçlar fiber modülünün matrisin modülüne oranının üç farklı değeri için Şekil 3.5’ de çizilmiştir. Eğer $V_f = 1$ ise ifade edilen modül fiberlerinkidir. Bununla birlikte, σ_2 çekme gerilmesi uygulanması durumunda fiberler arasında kuramsal olarak kusursuz bir bağlanma olduğu kabulü yapılmaktadır. Eğer σ_2 bası gerilmesi şeklinde uygulanırsa böyle bir kabul yapılamamaktadır. $E_f = 10.E_m$ olsa bile dik doğrultudaki E_2 modülünün matrisin elastisite modülünün iki katı kadar arttırabilmek için fiberlerin hacminin %50’ sinden fazlasına gerekli olduğu görülür. Bunun anlamı, fiberlerin yüzdesi uygulanamaz şekilde yüksek olmadıkça, fiberlerin dik doğrultudaki modüle fazla bir katkıda bulunamayacağıdır. Böylece, E_2 kompozit malzeme özelliğinin matrisin özelliğine sahip olduğu söylenebilir (Jones, 1999).



Şekil 3.5 Fiber hacim oranı ile E_2 ' nin değişimi (Jones, 1999)

Basit seri yay modeli Şekil 3.6’ da 2-doğrultusunda yüklenmiş numuneyi göstermektedir. Burada, matris esneklik zincirinde yumuşak bağlantıdır. Böylece, matris için yay esnekliği oldukça düşük alınır. Bu temel üzerinde matris deformasyonunun kompozit malzemenin deformasyonunda hakim olduğu beklenmelidir.



Şekil 3.6 Fiber takviyeli kompozitte deformasyon paylaşımı (Jones, 1999)

Açıktça bahsedilen türetilmelerle ilgili olarak yapılan öngörüler tamamıyla gerçekleşmez. Birbirine uygun olmayan enine uzamalar, Denklem (3.8)' den dolayı fiber ve matris arasındaki sınırdaki bulunur. Daha fazlası, fiberdeki ve matristeki enine gerilimler, v_f ' in v_m ' e eşit olmamasından dolayı muhtemelen aynı değildir. Karşılık olarak, fiber ve matris arasındaki sınırın ortasındaki deplasmanların tam bir eşleşmesi, dik doğrultudaki elastisite modülü için kesin bir çözüm oluşturmaktadır. Böyle bir çözüm yalnızca elastisite teorisi kullanılarak bulunabilir. Böyle tutarsızlıkların ciddiyeti yalnızca deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak belirlenebilir.

Bu çözüm üzerine diğer bir inceleme, fiberin ve matrisin Poisson oranları eşit değilse ki muhtemelen farklıdır, boyuna gerilmeler fiber-matris sınırında eşlik eden kayma gerilmesi ile birlikte etki eder. Böyle kayma gerilmeleri doğal olarak bir miktar gerilme seviyeleri altında ortaya çıkacaktır.

3.6.1.3 v_{12} ' nin Belirlenmesi

Poisson oranı olarak bilinen v_{12} , E_1 ' in analizine benzer bir yaklaşımla bulunur. İlk olarak, Poisson oranı,

$$v_{12} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (3.15)$$

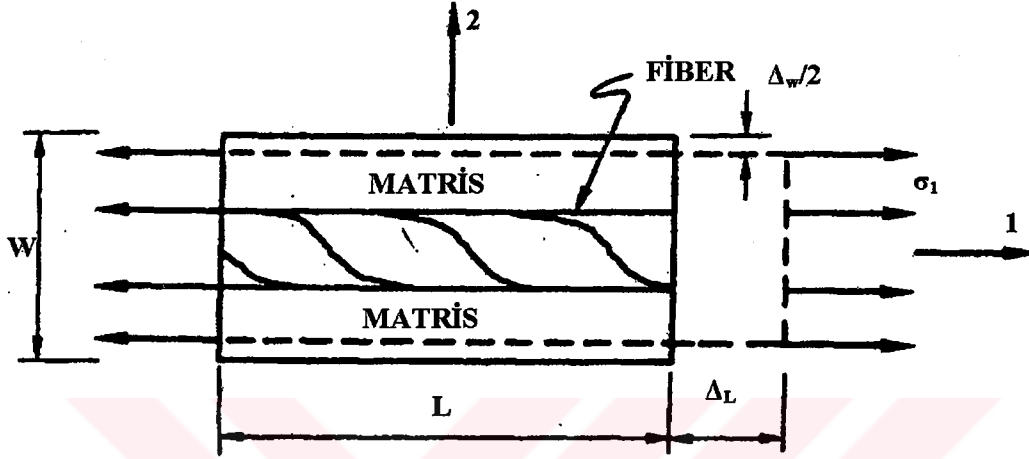
olarak $\sigma_1 = \sigma$ ve diğer tüm gerilmelerin sıfır olduğu durum için yazılır. Bu durumdaki deformasyonlar, Şekil 3.7' deki numunede gösterilmektedir. Burada, temel basitleştirme yaklaşımı, E_1 ' e yaklaşımdaki gibi fiber uzamalarının fiber doğrultusundaki matris uzamalarına özdeş olduğudur. Dik doğrultudaki deformasyon Δ_w makroskobik olarak,

$$\Delta_w = -W \cdot \epsilon_2 = W \cdot v_{12} \cdot \epsilon_1 \quad (3.16)$$

dir, fakat aynı zamanda mikroskobik olarak,

$$\Delta_w = \Delta_{mW} + \Delta_{fW} \quad (3.17)$$

dir.



Şekil 3.7 1-Doğrultusunda yüklenen eleman (Jones, 1999)

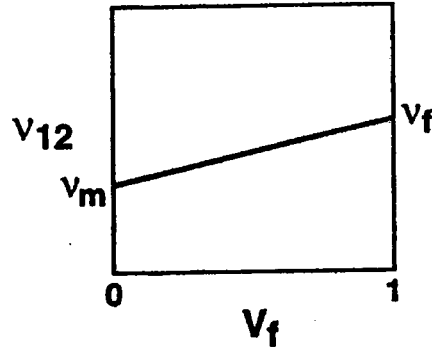
Dik doğrultudaki elastisite modülü E_2 için analizin hareket şekli, dik doğrultudaki deformasyonlar Δ_{mW} ve Δ_{fW} yaklaşık olarak, şunlara eşittir.

$$\Delta_{mW} = W \cdot V_m \cdot v_m \cdot \epsilon_1 \quad \Delta_{fW} = W \cdot V_f \cdot v_f \cdot \epsilon_1 \quad (3.18)$$

Denklemler (3.16)-(3.18)' in birleştirilmesi ve $\epsilon_1 W$ ' ya bölünmesiyle

$$v_{12} = v_m \cdot V_m + v_f \cdot V_f \quad (3.19)$$

Poisson oranı için karışımlar kuralı bulunur ve Şekil 3.8' de E_1 ' e benzer tarzda çizilir. Çünkü Poisson oranları v_m ve v_f birbirlerinden önemli miktarda farklı değildir, kompozit malzemenin Poisson oranı v_{12} tarafsızdır, yani ne matrisin hakim olduğu ne de fiberin hakim olduğu durum söz konusudur (Jones, 1999).



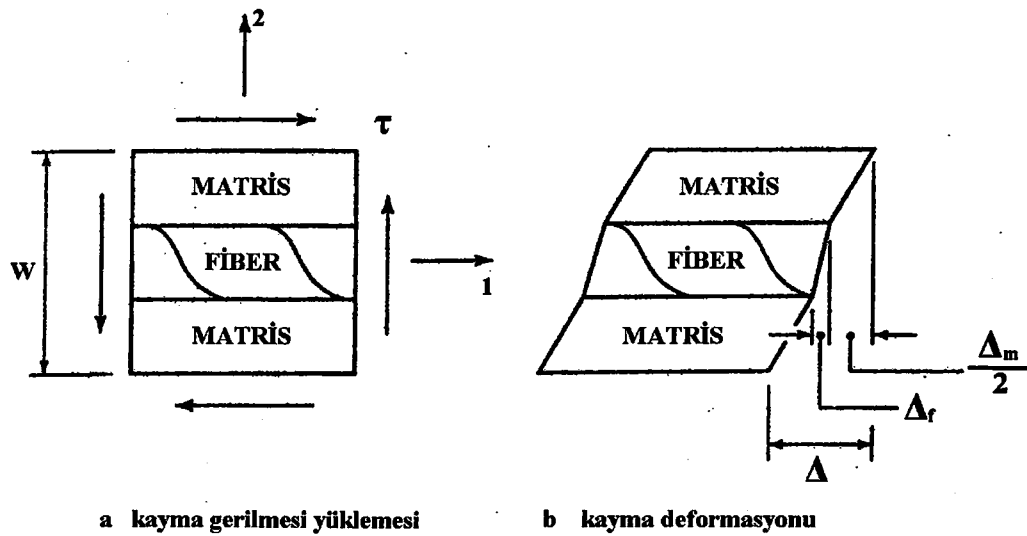
Şekil 3.8 Fiber hacim oranı V_f ile Poisson oranı v_{12} 'nin değişimi (Jones, 1999)

3.6.1.4 G_{12} 'nin Belirlenmesi

Bir tabakanın düzlem içindeki kayma modülü G_{12} , fiber ve matris üzerindeki kayma gerilmelerinin aynı olduğu varsayımıyla malzemelerin mekaniğine yaklaşılr (açık olarak, kayma deformasyonları aynı olamaz). Yükleme Şekil 3.9'daki numune üzerinde gösterilmiştir. Temel varsayımdan dolayı,

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \quad \gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \quad (3.20)$$

dir. Fiber takviyeli kompozit malzemelerin tipik doğrusal olmayan kayma gerilmesi-kayma uzaması davranışı önemsenmez, yani davranış doğrusal olarak kabul edilir.



Şekil 3.9 Kayma yüklemesi yapılan eleman (Jones, 1999)

Mikroskobik ölçekte, deformasyonlar Şekil 3.9' da gösterilmiştir. Göz önünde bulundurulması gereken, matrisin daha düşük kayma modülüne sahip olmasından dolayı kayma sırasında matrisin fiberden daha fazla şekil değiştirmesidir. Toplam kayma deformasyonu şu şekildedir;

$$\Delta = \gamma \cdot W \quad (3.21)$$

yaklaşık olarak, mikroskobik deformasyonlar,

$$\Delta_m = V_m \cdot W \cdot \gamma_m \quad \Delta_f = V_f \cdot W \cdot \gamma_f \quad (3.22)$$

dir. Daha sonra, $\Delta = \Delta_m + \Delta_f$ in W ile bölünmesi ile

$$\gamma = V_m \cdot \gamma_m + V_f \cdot \gamma_f \quad (3.23)$$

elde edilir veya denklem (3.20)' nin yukarıda konulması ve makroskobik olarak gerçekleştirilmesiyle

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{12}} \quad (3.24)$$

elde edilir. Denklem (3.23) şu şekilde yazılabilir;

$$\frac{\tau}{G_{12}} = V_m \cdot \frac{\tau}{G_m} + V_f \cdot \frac{\tau}{G_f} \quad (3.25)$$

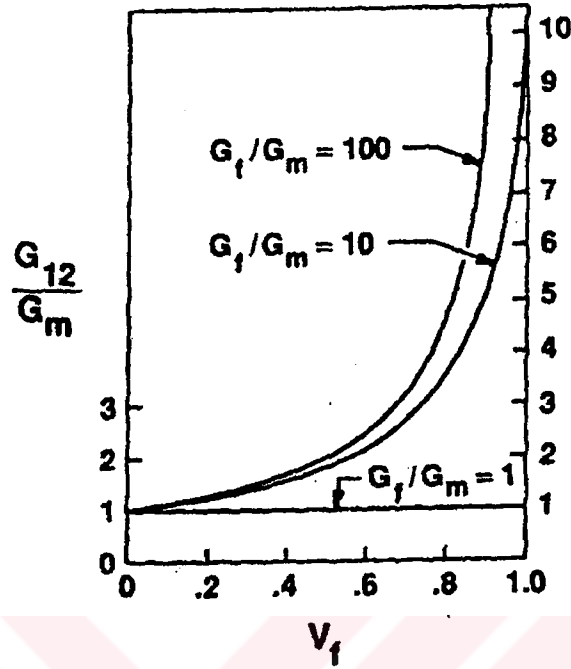
sonuç olarak

$$G_{12} = \frac{G_m \cdot G_f}{V_m \cdot G_f + V_f \cdot G_m} \quad (3.26)$$

bulunur. Bu ifadenin aynısı dik doğrultudaki elastisite modülü E_2 için bulunmuştur. E_2 ' deki gibi, G_{12} için olan ifade, modül matris ilişkisi kurularak normalize edilebilir, bu da,

$$\frac{G_{12}}{G_m} = \frac{1}{V_m + V_f \cdot (G_m/G_f)} \quad (3.27)$$

dir. G_f/G_m ' in çeşitli değerleri Şekil 3.10' da gösterilmiştir. Yalnızca toplam hacmin %50' sinden daha fazla fiber hacmi için $G_f/G_m = 10$ olduğunda G_{12} ' deki artış G_m ' e göre iki kat daha fazladır. E_2 ' deki gibi kompozit malzemenin kayma modülü G_{12} matrisin özelliğine sahip olduğu söylenebilir (Jones, 1999).



Şekil 3.10 Fiber hacim oranı V_f ile G_{12} 'nin değişimi (Jones, 1999)

3.6.2 Dayanım Yaklaşımları

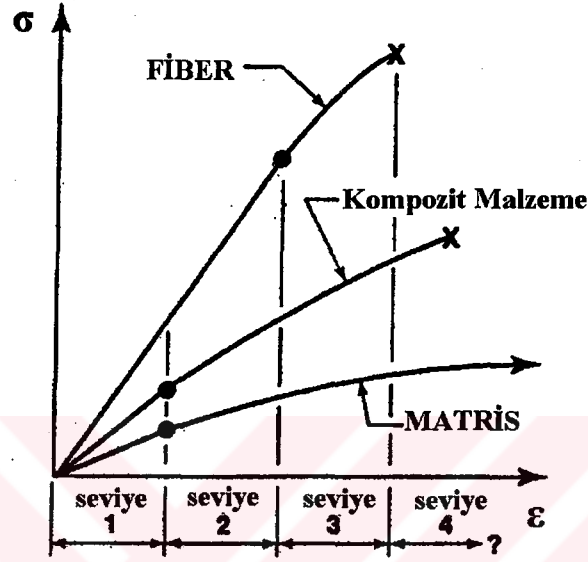
Fiber doğrultusundaki çekme dayanımı:

Tek doğrultuda fiber takviyeli kompozit malzemeler ardışık dört aşama içinde yük artarken deforme olurlar, deformasyonun fazla veya az olması fiber ve matrisin göreceli olarak gevrekliğine veya düktilitesine bağlıdır.

- (1) Hem fiberler hem de matris elastik olarak deforme olur.
- (2) Fiberler elastik olarak şekil değiştirmeye devam ederken, matris plastik olarak deforme olur.
- (3) Hem fiberler hem de matris plastik olarak deforme olur.
- (4) Fiberlerin kırılmasını kompozit malzemenin kırılması izler.

Bu aşamalar fiberler, matris ve kompozit malzeme için genel gerilme-uzama eğrisinde Şekil 3.11' de gösterilmiştir. Fiberler, genel olarak kompozit malzemeyi oluşturan iki malzemeden daha esnek, daha dayanıklı ve daha az düktil olanıdır, Şekil 3.11' de gösterildiği gibi, gevrek fiberler için 3. aşama gerçekleşmeyebilir. Benzer şekilde, gevrek bir matriste 2. aşamayı veya 3. aşamayı geçemeyebilir.

Kompozit malzemenin kırılıp kırılmayacağı, matrise karşılık fiberlerin bağlı düktilitesine bağlı olan matris kırılmasına göre veya fiber kırılmasına göre olur (Jones, 1999).



Şekil 3.11 Fiber takviyeli kompozit malzemenin deformasyon aşamaları (Jones, 1999)

Eşit dayanımlı fiberler:

Fiberlerin hepsinin aynı dayanıma sahip oldukları ve bağlı olarak matrisle karşılaştırıldıklarında daha gevrek oldukları göz önüne alınır. Bundan başka, hem fiberler hem de matris yalnızca doğrusal elastik aralıkta (Şekil 3.11' deki 1. aşama) hareketlidirler. Eğer kompozit malzeme minimum fiber hacim oranı V_f' den daha fazlasına sahip ise, çekme dayanımı, fiberler maksimum gerilimlerine kadar uzatıldıklarında aşılır. Bu durumda, uzamaların ifadesi,

$$\epsilon_{c,max} = \epsilon_{f,max} \quad (3.31)$$

olur. Çünkü fiberler matristen daha fazla gevrek, matris gibi uzayamazlar. Böylece, uzamaya göre fiberler kompozit malzeme içeriklerindeki dayanım zincirinde zayıf bağlantıdır.

Şekil 3.12' de gösterilen fiberler ve matris için yalnızca Şekil 3.11' in 1. aşamasını şematik olarak gösteren gerilme-uzama eğrileri kompozit malzeme dayanımını bulmak için yorumlamada kullanılır. Böylece eğer fiber uzaması ϵ_f ' in mikromekanik ifadesinin çıkartılmasındaki gibi fiberler doğrultusundaki matris uzamasına eşit olduğu varsayılırsa kompozit malzemenin dayanımı şu şekilde olur:

$$\sigma_{c,max} = \sigma_{f,max} \cdot V_f + (\sigma_m)_{\epsilon_f,max} \cdot (1 - V_f) \quad (3.32)$$

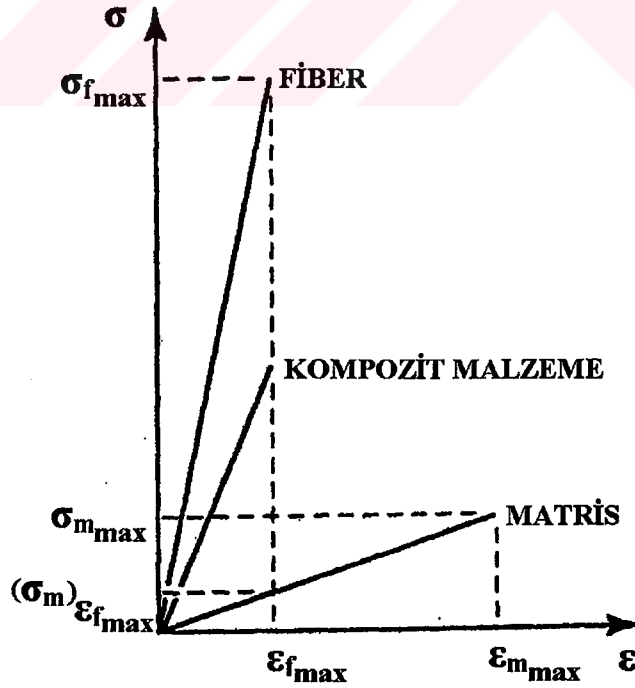
Burada $\sigma_{f,max}$ = maksimum fiber çekme dayanımı.

$(\sigma_m)_{\epsilon_f,max}$ = matris uzamasının fiberlerdeki maksimum çekme uzamasına eşit olduğu andaki matris gerilmesi.

Açıkça, eğer fiber takviye matrisin yalnız olarak bulunabildiğinden daha büyük dayanıma sahip olursa böylelikle

$$\sigma_{c,max} > \sigma_{m,max} \quad (3.33)$$

yazılabilir.



Şekil 3.12 Fiberler ve matris için şematik gerilim-uzama eğrileri (Jones, 1999)

Denklemler (3.32) ve (3.33) kompozit malzemenin fiber dayanımını bulmak için aşması gereken kritik V_f ' e göre çözülebilir:

$$V_{f,kritik} = \frac{\sigma_{m,max} - (\sigma_m)_{\epsilon_{f,max}}}{\sigma_{f,max} - (\sigma_m)_{\epsilon_{f,max}}} \quad (3.34)$$

V_f ' in daha küçük değerlerinde, matris uzamasını kontrol etmek için yeterli fiber olmamasından dolayı kompozit malzemenin davranışı Denklem (3.32)' yi izlemeyebilir. Bunun anlamı, matrisin kompozit malzemeye hakim olduğudur ve bu durum fiberler boyunca sürdürülür. Böylece, fiberler yalnızca küçük yüklerle bile yüksek uzamalara maruz kalabilirler ve kırılabilirler. Eğer bütün fiberler aynı uzamada kırılırsa, matris kompozit malzeme üzerine gelen tüm yükü almadıkça kompozit malzeme kırılacaktır, yani;

$$\sigma_{c,max} < \sigma_{m,max} \cdot V_m \quad (3.35)$$

Böylece bu durumda, matris kompozit malzeme dayanımına yalnızca yardım eden bir etkidir. Aslında, kompozit malzeme matris miktarı V_m ve boşluk miktarı V_f olarak hareket eder. Son olarak, tüm kompozit malzeme fiberlerin kırılmasından sonra hasara uğrar, eğer

$$\sigma_{c,max} = \sigma_{f,max} \cdot V_f + (\sigma_m)_{\epsilon_{f,max}} \cdot (1 - V_f) \geq \sigma_{m,max} \cdot (1 - V_f) \quad (3.36)$$

olursa Denklem (3.36)' nın doğruluğu için minimum V_f şu şekilde bulunabilir;

$$V_{f,minimum} = \frac{\sigma_{m,max} - (\sigma_m)_{\epsilon_{f,max}}}{\sigma_{f,max} + \sigma_{m,max} - (\sigma_m)_{\epsilon_{f,max}}} \quad (3.37)$$

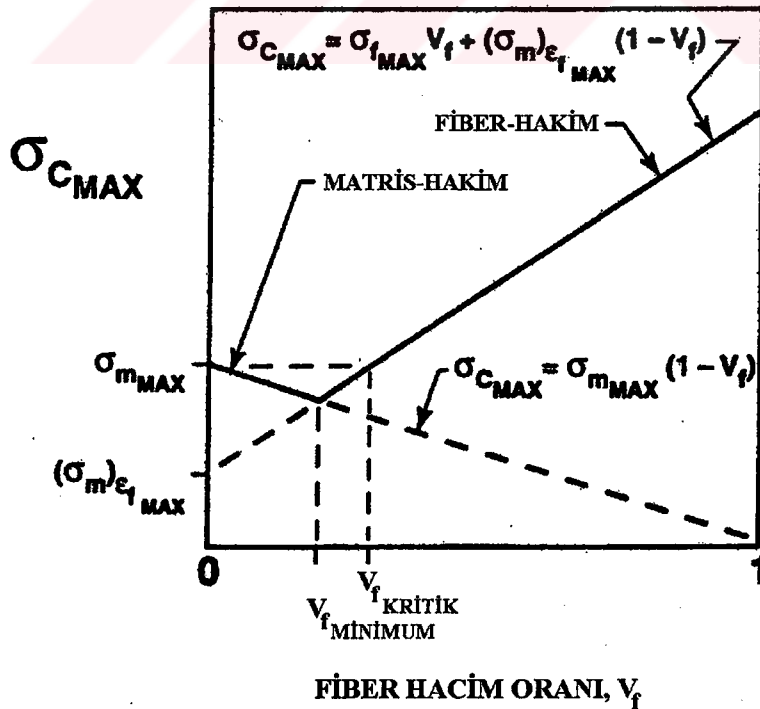
Önceki ifadeler, denklemler (3.32)-(3.37), Şekil 3.13' teki gibi çizildiklerinde daha kolay anlaşılır. Burada kompozit malzeme maksimum dayanımı fiber hacim oranının fonksiyonu olarak çizilmiştir. V_f , $V_{f,minimum}$ ' dan daha düşük olduğunda kompozit malzeme dayanımı matris deformasyonu tarafından kontrol edilir ve gerçekten matris dayanımından daha düşüktür. V_f , $V_{f,minimum}$ ' dan daha büyük fakat $V_{f,kritik}$ ' ten daha küçük olduğunda kompozit malzeme dayanımı fiber deformasyonu tarafından kontrol edilir, fakat kompozit malzeme dayanımı matris dayanımından daha azdır. Yalnızca V_f , $V_{f,kritik}$ ' i aştığında kompozit malzeme sahip olduğu

fiberlerin dayanımına ulaşır. Daha sonra, V_f , $V_{f,\text{minimum}}$ ' dan büyük olduğundan kompozit malzeme dayanımı fiber deformasyonu tarafından kontrol edilir. Şekil 3.13' ün şekli $V_{f,\text{kritik}}$ değişimlerine göre değişecektir. Aynı zamanda, Denklem (3.34)' ten $V_{f,\text{kritik}}$ değeri,

$$\sigma_{m,\text{max}} \equiv (\sigma_m)_{\epsilon_f,\text{max}} \quad (3.38)$$

olduğu zaman cam fiber takviyeli resin matrisi için küçük olur. Daha sonraki durumda, kompozit malzeme dayanımı $V_{f,\text{kritik}}$ her zaman $V_{f,\text{minimum}}$ ' u aştığından sürekli fiber kontrollüdür.

Önceki analizler, tüm fiberlerin aynı aksenal pozisyonda kırıldığı eşit dayanımlara sahip olduğu kabulüne dayanmaktadır. Bununla birlikte, fiberler gerilme altında hepsi aynı kırılma dayanımına sahip değildir ve aynı yerden kırılmaz. Daha doğrusu, yüzey süreksizliklerinin fiberden fibere değişmesinden dolayı, ayrı ayrı fiberler farklı kırılma dayanımlarına sahiptir. İstatiksel analiz kompozit malzemenin dayanımını makul olarak tanımlamak için gereklidir (Jones, 1999).



Şekil 3.13 Fiber hacim oranına karşılık kompozit çekme dayanımı (Jones, 1999)

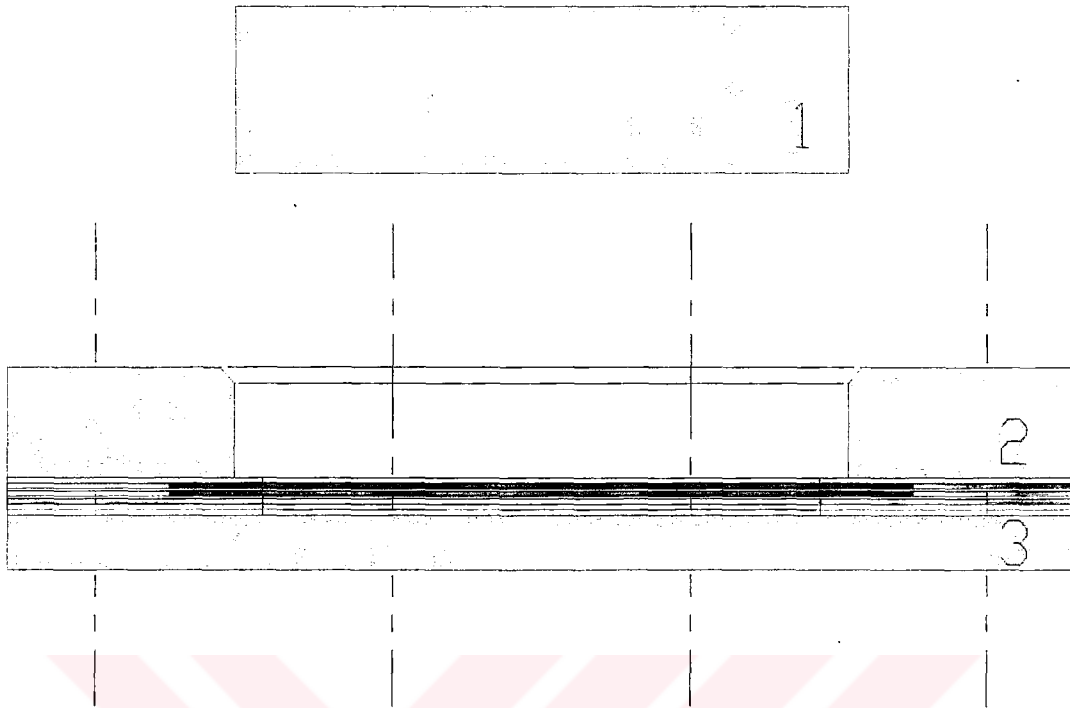
BÖLÜM IV

DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1 Deney Düzeneği

Şekil 4.1' de sıkıştırılmış döküm işlemini gerçekleştirmek için hazırlanmış olan deney düzeneği görülmektedir. Burada, üst kalıp, alt kalıp ve erkek parça için Bölüm 2.5.3' te anlatılan H13 (ASTM 2344) sıcak iş kalıp çeliği kullanılmıştır. Parçalar Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Takım Tezgahları Laboratuvarı' nda işlenmiş daha sonra İstaş Isıl İşlem San. A.Ş' de 50 HRC' ye sertleştirilmiş ve İzmir Kalıp San. A.Ş. ve Ne-Ka Kalıp San. Tic. Şti.' de tel erozyonu ile parçalara son şekli verilip taşlama işlemleri yapılmıştır.

Fiberleri yerleştirmek için kullanılan sac plakalar 0.4 mm ve 1 mm kalınlıklarında paslanmaz çelik levhalar olup yine Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Takım Tezgahları Laboratuvarı' nda işlenmiştir. Uygulanan basıncı karşılamak ve sızdırmayı engellemek için deney düzeneği, çevresindeki 8 adet M10 8.8 kalitedeki cıvata ile sıkılmıştır. Ayrıca, yine sızdırma problemini engellemek için paslanmaz çelik plakaların arasına cam elyafı konulmuştur.



Şekil 4.1 Sıkıştırılmış döküm deney düzeneği: 1-Erkek kalıp, 2-Üst kalıp, 3-Alt kalıp, Mavi-Fiber takviyeler, Sarı-Sac plakalar, Kırmızı-İzolasyon (cam elyafı)

4.2 Malzeme

Kompozitlerin üretimi için kullanılan matris alaşımının nominal bileşimi Al-%5.5Si-%0.55Mg olup, Cevher Döküm San. A.Ş.' de yapılan spectral analizi sonucunda bulunan kimyasal bileşimi Tablo 4.1' de verilmiştir. Matris alaşımı Dokuz Eylül Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Döküm Laboratuvarı' nda üretilmiştir. Fiber teller 0.5 mm çapında, ferritik paslanmaz çelik olup, %10 hacim oranında matris alaşımına takviye edilmiştir.

Tablo 4.1 Matris alaşımının kimyasal bileşimi

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ca
5.43	0.233	0.0206	0.0195	0.546	0.0127	0.0441	0.00047
Na	Pb	Sb	Sn	Sr	Ti	P	Al
0.00075	0.00995	0.00083	0.00120	0.00010	0.0755	0.00050	93.61

4.3 Üretim

Matris alaşımı, indüksiyon ocağı kullanılarak grafit pota içinde ergitilmiş ve önceden 150 °C' a ısıtılmış olan kokil kalıpların içine 680 °C' de dökülmüştür. 194 g olan başlangıçtaki döküm malzemesi potadaki kayıplar ve cüruf alma işlemi nedeniyle döküm sonrası 174 g' a düşmektedir.

Sıkıştırılmış döküm deneyleri uygun şartların tespiti için bir dizi denemeden sonra son aşamaya ulaşmıştır. Başlangıçta, elde edilen matris alaşımı fırın içerisinde grafit pota kullanılarak 700-800 °C aralığında çeşitli sıcaklıklarda, hürmüzle 120-200 °C arasında ön ısıtmaya tabi tutulan düzeneğin içerisine dökülmüş ve presle sıkıştırılmıştır. Ancak deneyler sonucunda köşelerin şekillenmediği ve kalıbın tamamının doldurulamadığı görülmüş ve ön ısıtmanın yeterli olmadığı ayrıca uzun pres stroğu nedeniyle dökümün basınç uygulanana kadar katılaştığı sonucuna varılmıştır. İkinci aşama olarak düzeneğin fırın içerisinde 500-600 °C aralığındaki çeşitli sıcaklıklara çıkartılıp presin altına götürülmüş ve ikinci bir fırın içerisinde grafit pota kullanılarak ergitilen matris alaşımı 700-800 °C aralığındaki çeşitli sıcaklıklarda kalıp içerisine dökülmüştür. Deneyler sonucunda bir önceki aşamadan daha iyi olmakla beraber yine de köşelerin tam olarak şekillenmediği ve kalıbın tamamının doldurulamadığı gözlenmiştir. Bunun sebepleri olarak da düzeneğin fırından çıkartılıp pres altına yerleştirilinceye ve ergimiş matris alaşımının diğer fırından getirilip dökülünceye kadar geçen süre içerisinde düzeneğin ve ergimiş döküm malzemesinin soğuduğu ve uzun pres stroğu nedeniyle de basıncın kritik gecikme zamanını aştıktan sonra uygulandığı sonuçları çıkarılmıştır. Bu aşamada elde edilen numunelerin kimyasal bileşimleri Tablo 4.2' de verilmiştir. Tablo 4.2' nin Tablo 4.1 ile karşılaştırılmasından fırında ergitilerek dökülen matris alaşımında başta Si olmak üzere hemen hemen tüm bileşimlerinde belirgin bir düşme olduğu görülmektedir.

Tablo 4.2 Fırında ergitilerek dökülen matris alaşımının kimyasal bileşimi

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ca
2.01	0.0669	0.00628	0.0116	0.352	0.00830	0.0339	0.00131
Na	Pb	Sb	Sn	Sr	Ti	P	Al
0.00104	0.00565	0.00050	0.00120	0.00010	0.101	0.00050	97.40

Son olarak deney düzeneğinde kalıp boşluğu içerisine yaklaşık 70 g matris alaşımı konularak beraber fırında ısıtılmışlardır. Matris alaşımı düzenek içinde ergitildikten sonra düzenek presin altına götürülmüş, diğer fırında ısıtılan erkek parça da yerleştirildikten sonra sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda köşelerin şekillendiği ve ergimiş matris alaşımı üzerine tam olarak basınç uygulandığı görülmüştür.

Bu aşamadan sonra bütün deneylerde matris alaşımı düzenekle beraber 660 °C' ye çıkarılmış ve fırın içerisinde 10 dak rejimde bekletildikten sonra presin altına götürülmüş, diğer fırında 450 °C' ye çıkartılan erkek parça kalıp boşluğunun üzerine yerleştirilmiştir. Bu sırada pres koçu aşağı indirilmeye başlanmıştır ancak düzeneğin fırından çıkartılıp basma gerçekleşinceye kadar 45 s' lik bir basınç öncesi gecikme zamanına izin verildikten sonra basınç uygulanmaya başlanmıştır. Basınç 16 t' a (65.4 MPa) çıkarıldıktan sonra 60 s süreyle basınç uygulanmaya devam edilerek katılaşmanın basınç altında gerçekleşmesi sağlanmıştır. Sonrasında kalıp oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ve yaklaşık 1 h sonra numune kalıp içerisinden çıkarılmıştır.

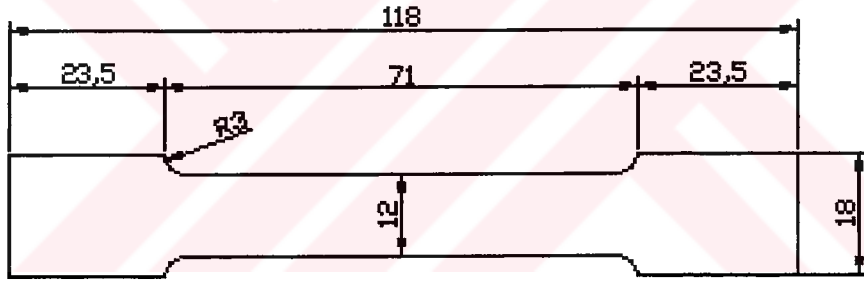
Deneylerde önce matris alaşımının takviye kullanılmadan sıkıştırılmış dökümü yapılmış sonra sırasıyla çift yönlü takviyeli ve tek yönlü takviyeli kompozit malzemelerin sıkıştırılmış dökümü gerçekleştirilmiştir.

Sıkıştırılmış döküm düzeneğinin tüm temas yüzeyleri Bölüm 2.5.7' de değinildiği gibi grafit bazlı özel bir yağlayıcı ile yağlanmıştır. Sıkıştırılmış döküm deneyleri Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Mekanik Test ve Araştırma Laboratuvarı' nda gerçekleştirilmiştir.

Üretilen malzemeler İzmir Kalıp San. A.Ş' de. tel erozyonunda işlenerek mekanik deneyler için hazır hale getirilmiştir. Çekme, Iosipescu, 30° lik çekme ve basma deneylerinin hepsi bilgisayar destekli SHIMADZU test ölçüm cihazında yapılmıştır.

4.4 Çekme Deneyi

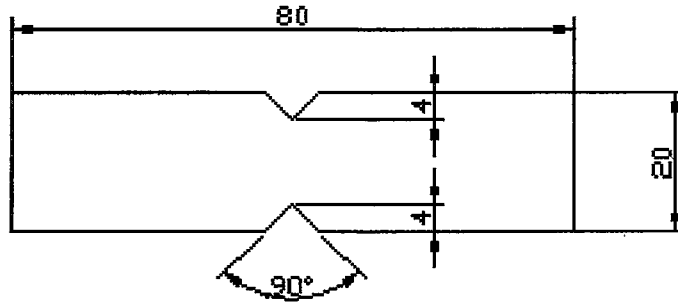
Bölüm 3.6.2' de anlatılan fiber doğrultusu yönündeki mukavemet değerleri ve % uzama miktarları, Bölüm 3.6.1.1' de anlatılan E_1 elastisite modülü ve Bölüm 3.6.1.3'te anlatılan ν_{12} Poisson oranı değerini belirlemek için gerekli olan uzama miktarları bulunmuştur. Çekme deneyinde kullanılan numunenin boyutları Şekil 4.2' de verilmiştir.



Şekil 4.2 Çekme deneyi numunesinin boyutları

4.5 Iosipescu Deneyi

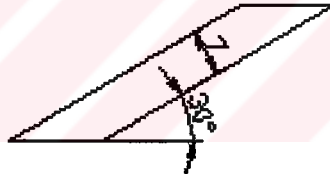
Akma kayma mukavemeti S' i ve Bölüm 3.6.1.4' te anlatılan G_{12} kayma modülü değerini belirlemek için gerekli olan uzama miktarları bulunmuştur. Iosipescu deneyinde kullanılan numunenin boyutları Şekil 4.3' te verilmiştir.



Şekil 4.3 Iosipescu deneyi numunesinin boyutları

4.6 30° lik Çekme Deneyi

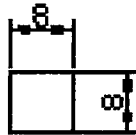
Bölüm 3.6.1.2’ de anlatılan E_2 elastisite modülü değerini belirlemek için gerekli olan uzama miktarları bulunmuştur. 30° lik çekme deneyinde kullanılan numunenin boyutları Şekil 4.4’ te verilmiştir.



Şekil 4.4 30° lik çekme deneyi numunesinin boyutları

4.7 Basma Deneyi

Fiber doğrultusuna dik yöndeki mukavemet değerlerini belirlemek için yapılan basma deneyine ait numunelerin boyutları Şekil 4.5’ te verilmiştir.



Şekil 4.5 Basma deneyi numunesinin boyutları

4.8 Termal Genleşme Katsayılarının Tespiti

α_1 ve α_2 termal genleşme katsayılarını tespit etmek için fırın içerisinde yüksüz konumda bulunan numune oda sıcaklığından 50 °C' ye kadar ısıtılarak fiber doğrultusu ve fiber doğrultusuna dik yöndeki uzama miktarları bulunmuştur. Deney 30° lik çekme deneyinde kullanılan numunelerle gerçekleştirilmiştir.

4.9 Sertlik Ölçümleri

Hazırlanan numunelerin Vickers sertlik değerleri (Hv), WPM sertlik ölçme aleti ile oda sıcaklığında, 5 kg' lık yük altında ve her numuneden en az beş ölçüm alınarak belirlenmiştir.

4.10 Tavlama İşlemleri

Çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeden alınan üç farklı numune üzerinde 250, 350, 450 °C' de 15 dak tavlama işlemleri yapılarak sertliklerindeki düşme gözlenmiştir.

4.11 Mikroyapısal İnceleme

Mikroyapısal karakterizasyon çalışmaları takviyesiz matris, tavlınmamış ve tavlınmış koşullardaki çift yönlü fiber takviyeli kompozit ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeler üzerinde; tane boyutu ve fiber/matris arayüzey reaksiyon bölgesi incelemeleri olarak yapılmıştır. İncelemeler optik bir mikroskoba bağlı olan LUCIA görüntü analiz cihazı ile yapılmıştır. Numuneler polyestere alındıktan sonra parlatılarak Keller çözeltisi ile matris için 18 s çift yönlü ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeler için 54 s süreyle dağlanmıştır.

Mikroyapısal karakterizasyon çalışmalarında ayrıca çift yönlü ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin kırık yüzeyleri incelenmiştir.

BÖLÜM V

SONUÇLAR

5.1 Çekme Deneyi Sonuçları

Sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen takviyesiz matris malzemesinin, çift yönlü ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerinin çekme deneyi sonuçları: fiber doğrultusundaki akma mukavemeti ($\sigma_{0.2}$), çekme mukavemeti (σ_u), kopma uzaması (ϵ), elastisite modülü (E_1) ve Poisson oranı (ν_{12}) ayrıca paslanmaz çelik fiberlerin normal koşullardaki ve 600 °C’ de 1 h tutulmuş koşullardaki akma mukavemeti ($\sigma_{0.2}$), çekme mukavemeti (σ_u), ve kopma uzaması (ϵ) değerleri Tablo 5.1’ de verilmiştir.

Rozet yapıştırılmak suretiyle fiber doğrultusundaki ve fiber doğrultusuna dik yöndeki uzama miktarları ölçülmüş ve bu değerler,

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \quad (5.1)$$

ve

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \epsilon_1 \quad (5.2)$$

formüllerinde kullanılarak E_1 değeri,

$$\nu_{12} = - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (5.3)$$

formülünde kullanılarak ν_{12} değeri hesaplanmıştır.

Tablo 5.1 Çekme deneyi sonuçları

Malzeme	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ (%)	E_1 (MPa)	ν_{12} (-)
Matris	91	147	4.24	66600	0.3287
Çift Yönlü	82	98	1.62	58000	0.3175
Tek Yönlü	124	136	2.08	82000	0.292
Fiber	305	405	12.86	-	-
Fiber 600°C' de 1 h	166	260	15.4	-	-

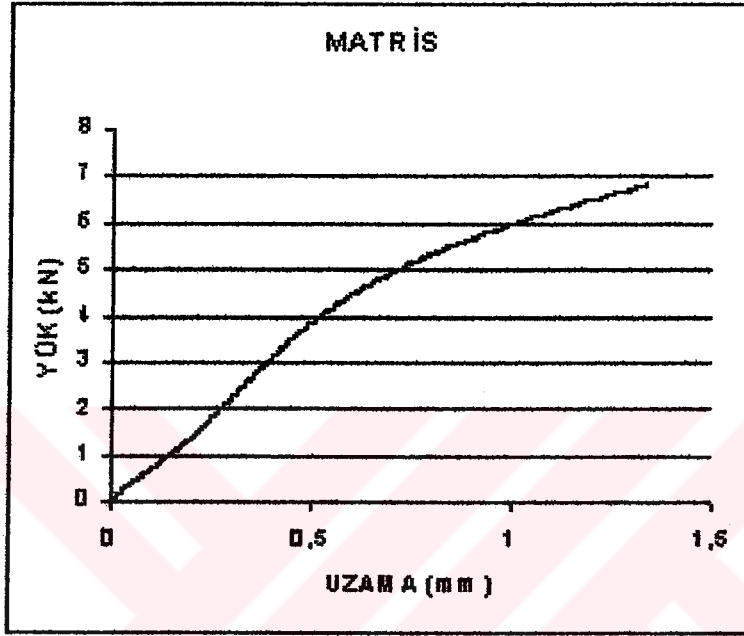
Ayrıca tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeleri için Bölüm 3.6.2' de anlatılan ve Denklem (3.32) karışımlar kuralı ile verilen $\sigma_{c \max}$ değeri, Bölüm 3.6.1.1' de anlatılan ve Denklem (3.7) ile verilen E_1 ve Bölüm 3.6.1.3' te anlatılan ve Denklem (3.19) ile verilen ν_{12} ' nin teorik değerleri hesaplanmış ve Tablo 5.2' de verilmiştir.

Tablo 5.2 Tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin teorik mukavemet değerleri

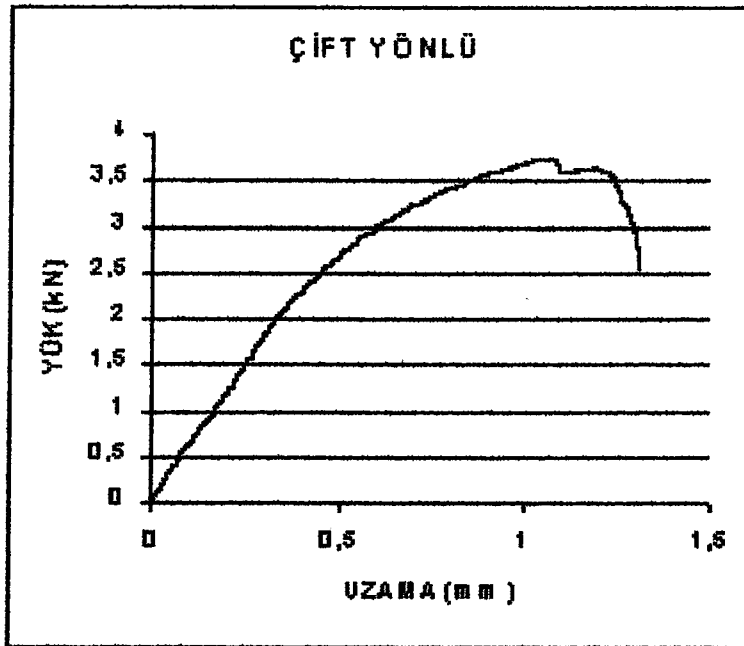
$\sigma_{c \max}$ (MPa)	E_1 (MPa)	ν_{12} (-)
128	80940	0.273

Tablo 5.1 ve Tablo 5.2 sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeler teorik değerlerine ulaştığını göstermektedir. Ancak, yine Tablo 5.1' den açıkça görülmektedir ki sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin mukavemet değerleri sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen takviyesiz matris alaşımının değerlerinden daha düşük bulunmuştur.

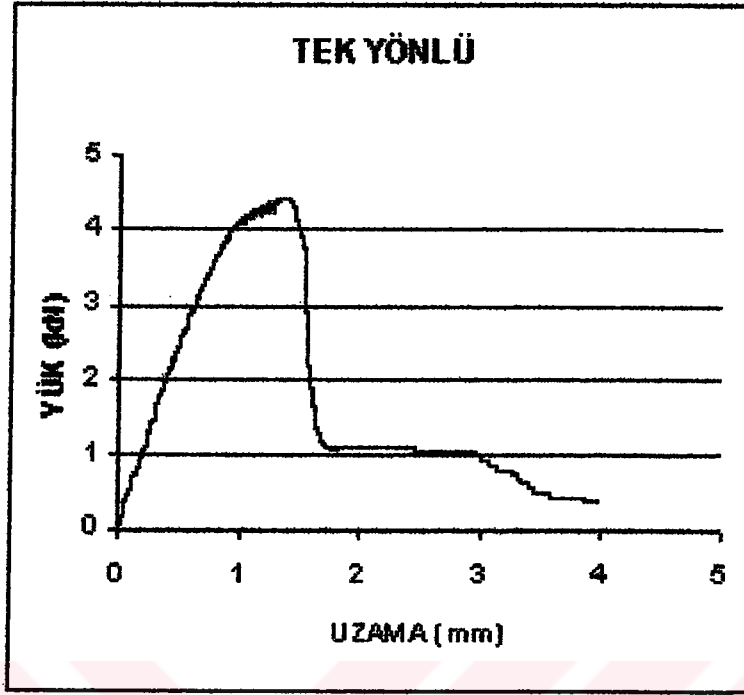
Takviyesiz matris alaşının, çift yönlü ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeler ve normal koşullardaki ile 600 °C' de 1 h tutulmuş durumdaki çelik fiberlerin yük- uzama grafikleri sırasıyla Şekil 5.1-5' te sunulmuştur.



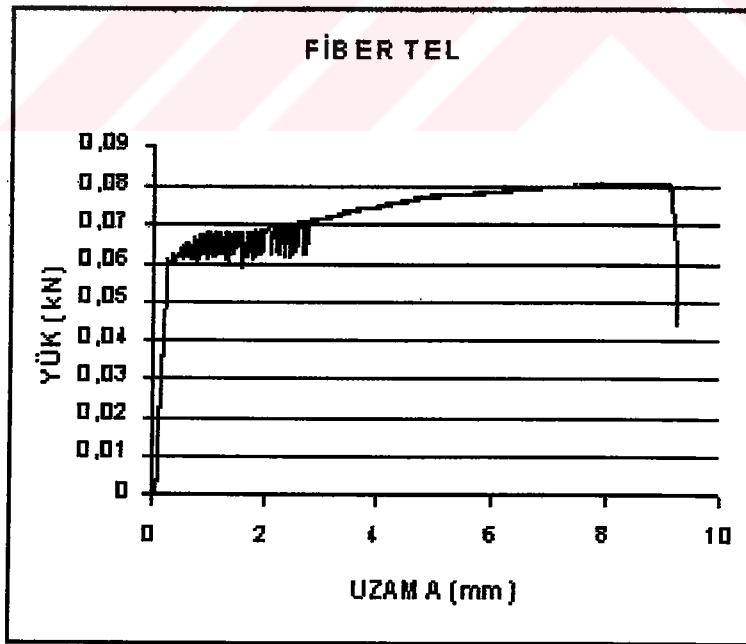
Şekil 5.1 Takviyesiz matris malzemesinin yük-uzama grafiği



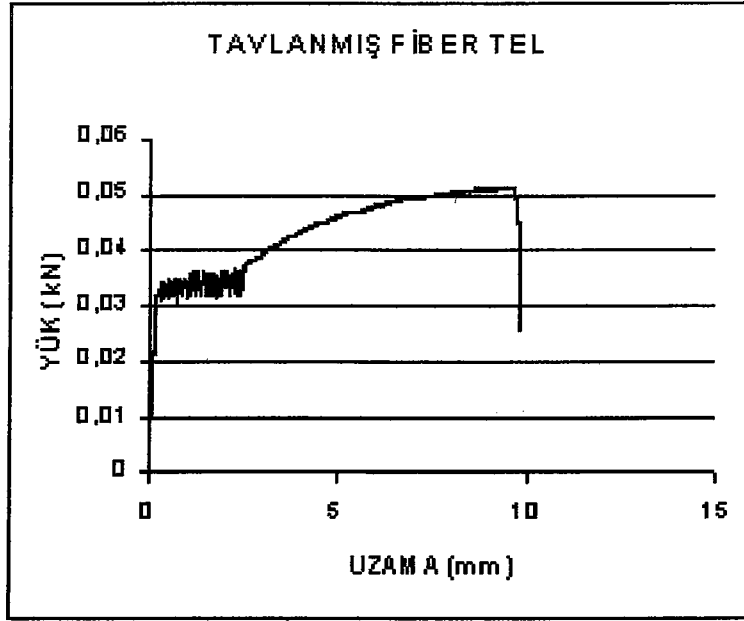
Şekil 5.2 Çift yönlü kompozit malzemesinin yük-uzama grafiği



Şekil 5.3 Tek yönlü kompozit malzemesinin yük-uzama grafiği



Şekil 5.4 Normal koşullardaki çelik fiberlerin yük-uzama grafiği



Şekil 5.5 600 °C’ de 1 h tutulmuş durumdaki çelik fiberlerin yük-uzama grafiği

5.2 Iosipescu Deneyi Sonuçları

Sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen çift yönlü ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerinin Iosipescu deneyi sonuçları: akma kayma mukavemeti (S) ve kayma modülü (G_{12}) ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeleri için Bölüm 3.6.1.4’ te anlatılan ve Denklem (3.26) ile verilen G_{12} ’ nin teorik değeri Tablo 5.3’ te verilmiştir.

45° lik açıyla yapıştırılmış straingauge (uzama ölçer)’ den ölçülen uzama miktarları,

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (5.4)$$

ve

$$G_{12} = \frac{\tau}{2\varepsilon} \quad (5.5)$$

Formüllerinde kullanılarak G_{12} değeri hesaplanmıştır.

Tablo 5. 3 Iosipescu deneyi sonuçları

Malzeme	S (MPa)	G ₁₂ (MPa)	Teorik G ₁₂ (MPa)
Çift Yönlü	60	19500	-
Tek Yönlü	64	28000	28916

Iosipescu deneyinden sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerinin teorik G₁₂ değerine yaklaştığı açıkça görülmektedir.

5.3 30° lik Çekme Deneyi Sonuçları

Takviyesiz matris malzemesinin ve çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerinin fiber doğrultusuna dik yöndeki elastisite modülleri (E₂), fiber doğrultusu yönündeki elastisite modülü (E₁)' e eşit olacağından hesaplanmamıştır. Yalnız sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemenin 30° deki elastisite modülü E_x strain gauge' ten ölçülen uzama miktarları Denklemler (5.1)-(5.3)' te yerine konulmasıyla hesaplanmıştır. Bu değer ve Bölüm 5.1 ve 5.2' de bulduğumuz E₁, ν₁₂ ve G₁₂ değerleri,

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_1} \cos^4 \theta + \left[\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1} \right] \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{E_1} \sin^4 \theta \quad [11] \quad (5.6)$$

formülünde yerine konularak buradan E₂ çekilir.

30° deki elastisite modülü (E_x), fiber doğrultusuna dik yöndeki elastisite modülü (E₂) ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeleri için Bölüm 3.6.1.2' de anlatılan ve Denklem (3.13) ile verilen teorik E₂ değerleri Tablo 5.4' te verilmiştir.

Tablo 5.4 Tek yönlü kompozit malzemelerin 30° lik çekme deneyi sonuçları

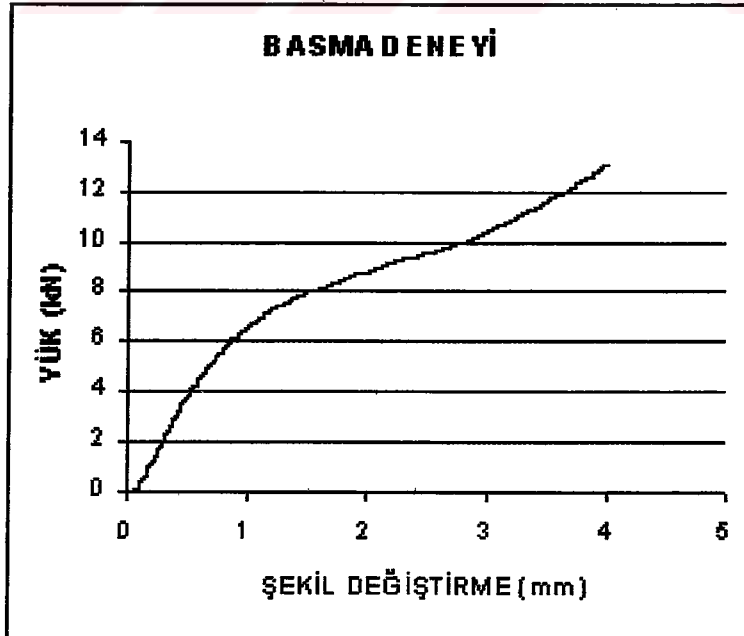
E _x (MPa)	E ₂ (MPa)	Teorik E ₂ (MPa)
75000	73000	71480

Tablo 5.4'ten sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin deneysel olarak bulunduğumuz fiber doğrultusuna dik yöndeki elastisite modülünün teorik olarak bulunan E_2 değerine yakın olduğu açıkça görülmektedir.

5.4 Basma Deneyi Sonuçları

Takviyesiz matris malzemesinin ve çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerinin fiber doğrultusuna dik yöndeki akma mukavemetleri ($\sigma'_{0.2}$) fiber doğrultusu yönündeki akma mukavemetine eşit olacağından hesaplanmamıştır. Yalnız sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiber doğrultusuna dik yöndeki akma mukavemetleri ($\sigma'_{0.2}$) yapılan basma deneyi ile belirlenmiştir.

Basma deneyi sonucunda tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiber doğrultusuna dik yöndeki akma mukavemetleri $\sigma'_{0.2} = 98$ MPa olarak bulunmuştur. Şekil 5.6' da basma deneyinin yük-şekil değiştirme grafiği verilmiştir.



Şekil 5.6 Tek yönlü kompozit malzemesinin basma yük-şekil değiştirme grafiği

5.5 Termal Genleşme DeneY Sonuçları

Tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin fiber doğrultusu ve fiber doğrultusuna dik yöndeki termal genleşme katsayıları sırasıyla α_1 ve α_2 ' yi saptamak için yüksüz konumda fırın içerisine konulan 30° lik çekme deneyinde kullandığımız numuneler oda sıcaklığından 50 °C' ye kadar çıkarılmış ve birbirlerine dik yöndeki iki strain gauge' ten okunan uzama miktarları,

$$\Delta \epsilon = \alpha \cdot \Delta T \quad (5.7)$$

formülünde kullanılarak α_x ve α_y değerleri bulunmuş, α_x ve α_y

$$\alpha_x = \alpha_1 \cos^2 \theta + \alpha_2 \sin^2 \theta \quad [25] \quad (5.8)$$

ve

$$\alpha_y = \alpha_1 \sin^2 \theta + \alpha_2 \cos^2 \theta \quad [25] \quad (5.9)$$

formüllerinde yerine konularak α_1 ve α_2 hesaplanmıştır.

Yapılan çalışmanın sonucunda bulunan α_x , α_y , α_1 ve α_2 değerleri Tablo 5.5' te verilmiştir.

Tablo 5.5 Termal genleşme katsayıları

α_x (1/°C)	α_y (1/°C)	α_1 (1/°C)	α_2 (1/°C)
$2.01 \cdot 10^{-5}$	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$19.65 \cdot 10^{-6}$	$21.45 \cdot 10^{-6}$

5.6 Sertlik Ölçümleri Sonuçları

Sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen takviyesiz matris malzemesinin, çift yönlü ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerinin ayrıca çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin 250, 350, 450 °C' de 15' er dak tavllanmış koşullardaki sertlik değerleri Tablo 5.6' da verilmiştir.

Tablo 5.6 Benzer koşullarda üretilen matris alaşımı ve kompozitlerin çeşitli koşullardaki Vickers sertlik değerleri

Malzeme	Matris	Çift Yönlü	Tek Yönlü	250 °C' de 15 dak	350 °C' de 15 dak	450 °C' de 15 dak
Sertlik (Hv)	57.1	57.6	57.3	53.9	40.5	39.3

Tablo 5.6' dan sıkıştırılmış döküm şartlarının yaklaşık 57 Hv sertlik değeri civarında malzeme ürettiği, tavlama ile malzemelerin sertlik değerlerinin düştüğü ve en uygun tavlama sıcaklığının 350 °C olduğu görülmüştür. 350 °C' de 15 dak tavlama ile sertlikte %29.7'lik bir düşme olmuştur.

5.7 Yoğunluk Hesaplamaları

Sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen takviyesiz matris malzemesinin, çift yönlü ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerinin yapılan yoğunluk ölçümleri sonuçları Tablo 5.7' de verilmiştir.

Kimyasal bileşimlerinden hesaplanan teorik yoğunluk (D_c) ile deneysel yolla bulunan yoğunluk (D_e) değerleri arasındaki fark yapıda mevcut olan poroziteyi göstermektedir.

Tablo 5.7 Teorik ve deneysel yoğunluk değerleri

Malzeme	Teorik Yoğunluk, D_c (g/cm^3)	Deneysel Yoğunluk, D_e (g/cm^3)	D_e / D_c %
Matris	2.7136	2.6862	98.990
Çift Yönlü	3.30988	3.2469	98.097
Tek Yönlü	3.2387	3.1979	98.740

5.8 Mikroyapı

Şekil 5.7' de takviyesiz matris malzemesinin, Şekil 5.8' de çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin, Şekil 5.9' da tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin, Şekil 5.10-12' de sırasıyla 250, 350, 450 °C' de tavllanmış çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin genel mikroyapıları gösterilmektedir.

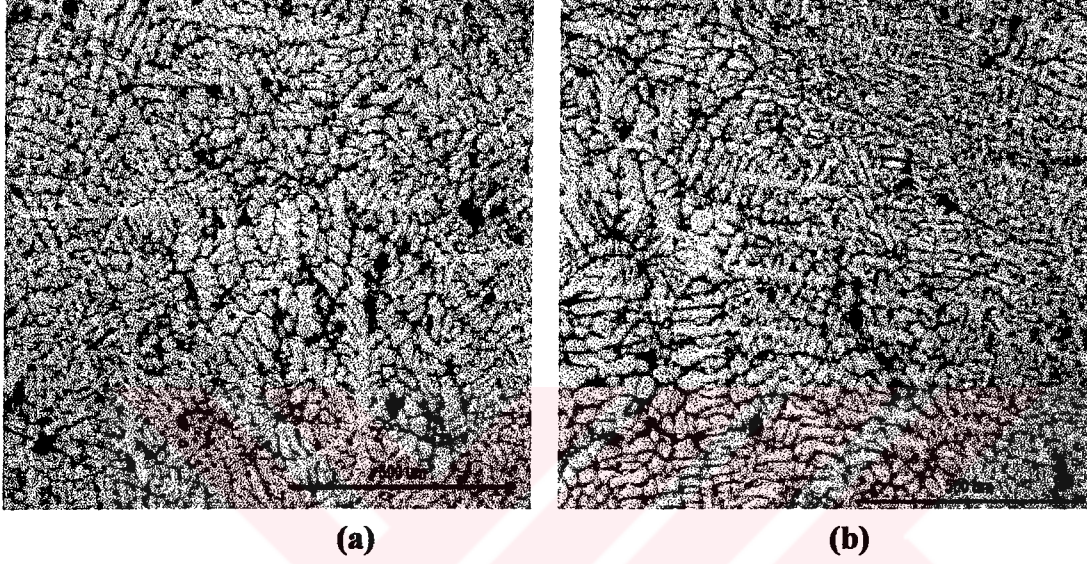
Şekil 5.7' den sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen takviyesiz matris malzemesinin dentritik yapıda olduğu açıkça görülmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda dentrit kolları arasındaki ortalama mesafe 13.62 μm olarak bulunmuştur.

Şekil 5.8' den sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin, kaba primer α Al tanelerinden oluştuğu ve tane sınırlarında Si tanelerinin çökeldiği ayrıca takviye ile Al matris arasında bazı bölgelerde kalın bir arayüzey tabakasının oluştuğu görülmektedir. Yapılan incelemeler sonucunda çelik tellerin civarındaki tanelerin daha ince (ortalama 97.61 μm), tellerden uzaktaki bölgelerdeki tanelerin daha kaba (ortalama 169.71 μm) olduğu bulunmuştur.

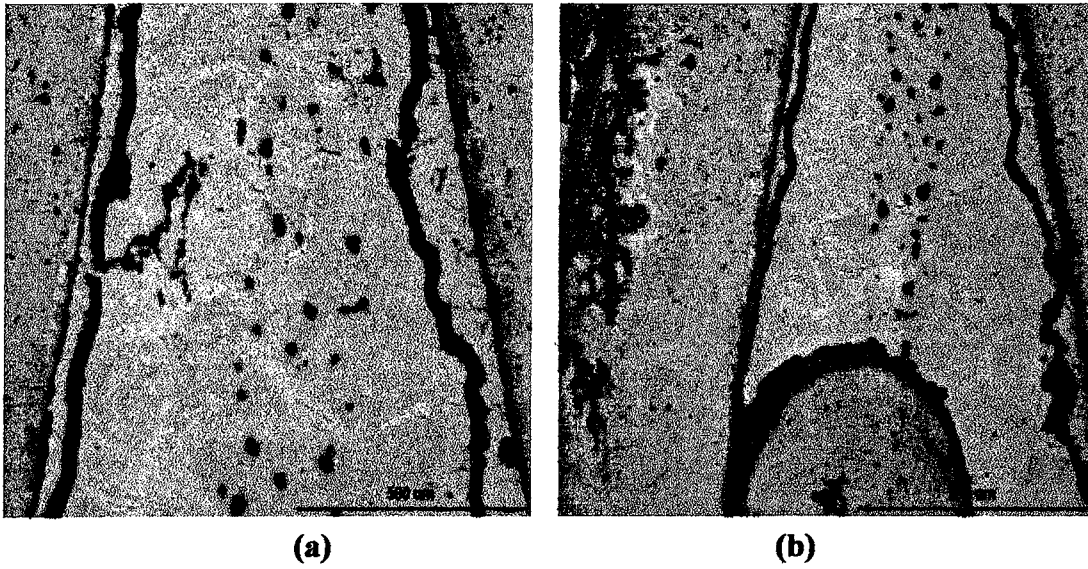
Şekil 5.9' dan sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin çift yönlüye göre daha ince primer α Al tanelerinden oluştuğu ve yine tane sınırlarında çökelen Si tanelerinin daha az olduğu, çelik takviyeler ile Al matris arasında daha ince bir arayüzey tabakasının oluştuğu görülmektedir. Ayrıca çelik takviyelerden başlayan çatlaklar da açıkça fark edilmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda ortalama tane boyutu 119.72 μm olarak bulunmuştur.

Şekil 5.10-12' de ise sırasıyla 250, 350 ve 450 °C' de tavllanmış sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin, tane yapılarındaki incelme görülmektedir. Yapılan incelemeler sonucunda 250 °C' de tavllanmış olan numunelerde bölgesel olarak bazı yerlerde ortalama 169.71 μm boyutunda kaba tanelerin, bazı yerlerde ise ortalama 73.21 μm boyutunda ince tanelerin oluştuğu gözlenmiştir. 350 °C' de tavlanan numunelerin dentritik yapı

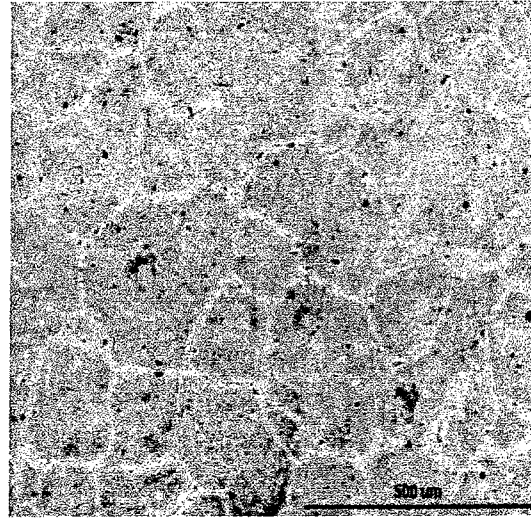
gösterdiği ve dentrit kolları arasındaki mesafenin $29.98 \mu\text{m}$ olduğu bulunmuştur. 450°C 'de tavlanan numunelerin ise çelik teller civarında dentritik yapı gösterdiği (ortalama $36.62 \mu\text{m}$ dentrit kolları arası mesafe) tellerden uzaklaştıkça dentritik yapı ile taneli yapının karışımı şeklinde olduğu görülmüştür.



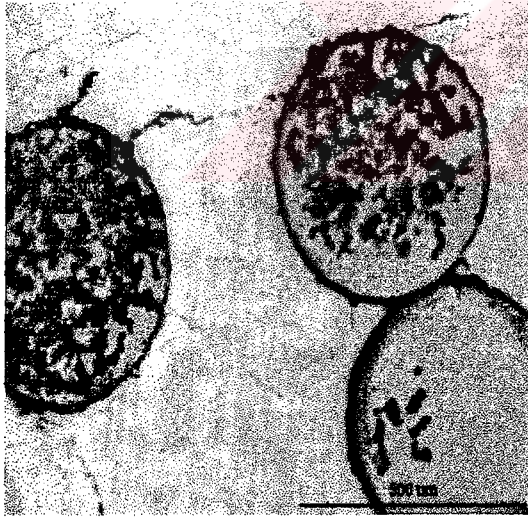
Şekil 5.7 Takviyesiz matris malzemelerin mikroyapıları



Şekil 5.8 Çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (a ve b)



(c)

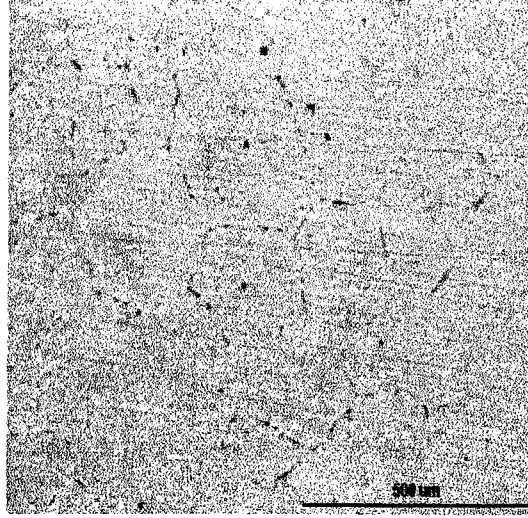
Şekil 5.8 Çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (c)

(a)

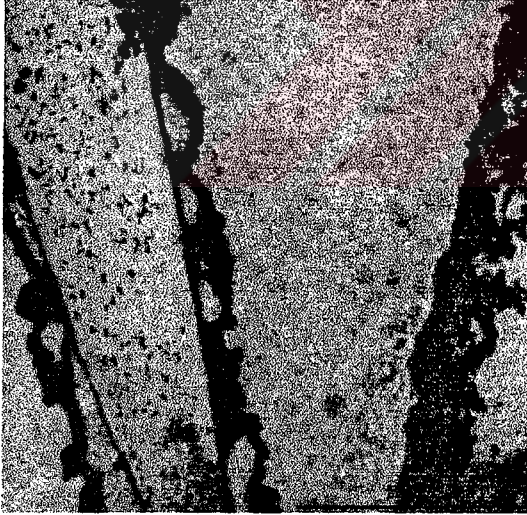


(b)

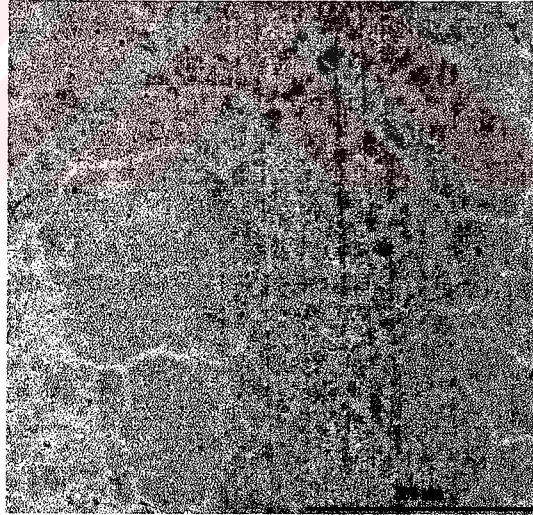
Şekil 5.9 Tek yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (a ve b)



(c)

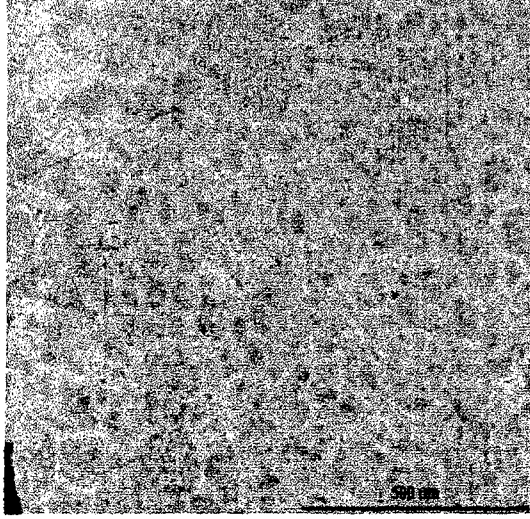
Şekil 5.9 Tek yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (c)

(a)



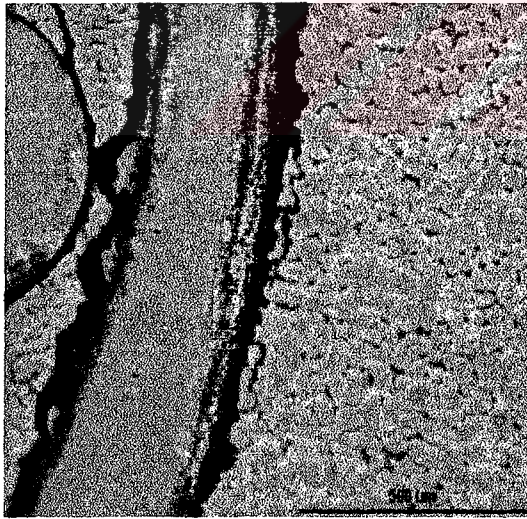
(b)

Şekil 5.10 250 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (a ve b)

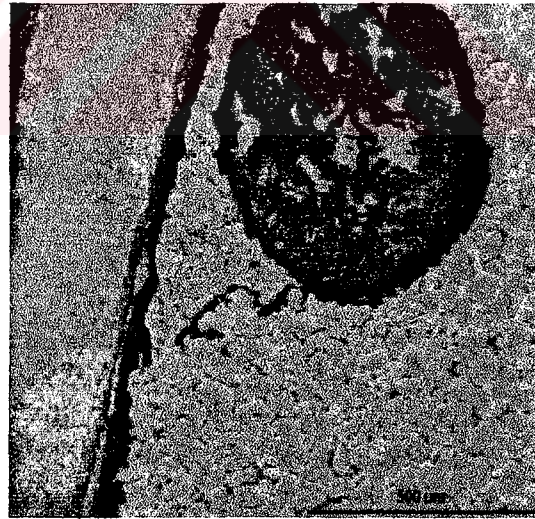


(c)

Şekil 5.10 250 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (c)



(a)



(b)

Şekil 5.11 350 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (a ve b)

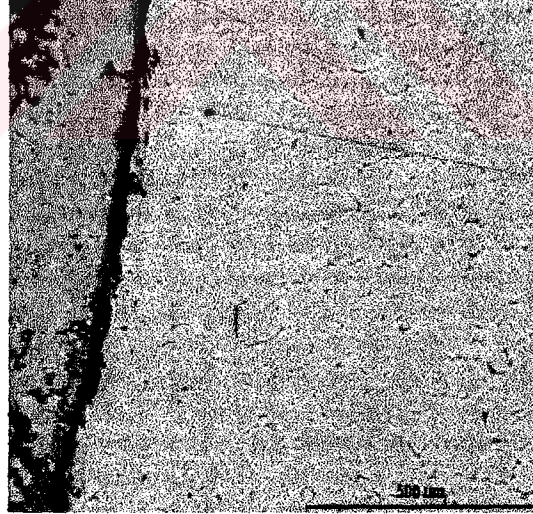


(c)

Şekil 5.11 350 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (c)

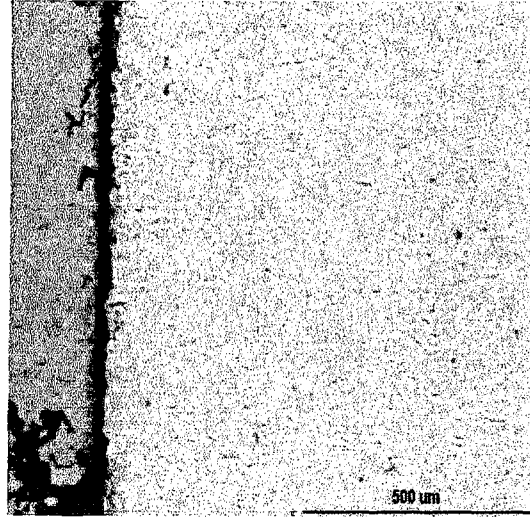


(a)



(b)

Şekil 5.12 450 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (a ve b)

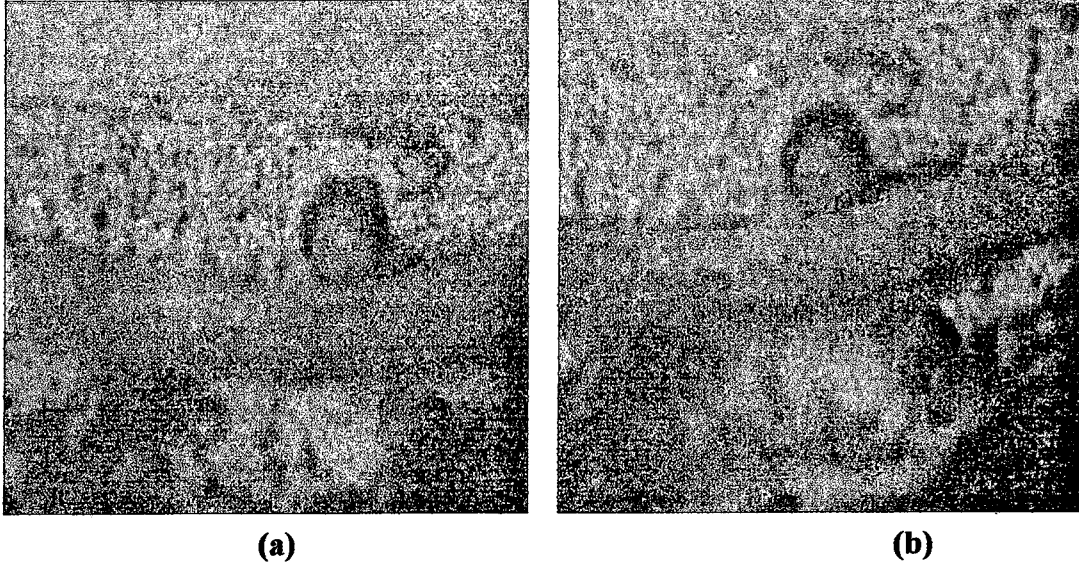


(c)

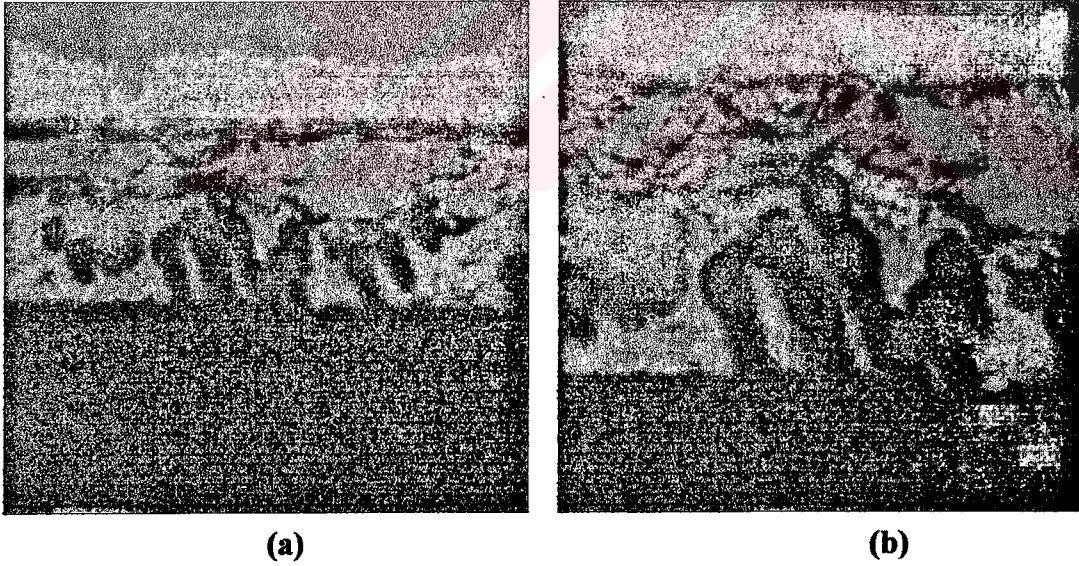
Şekil 5.12 450 °C' de tavllanmış çift yönlü kompozit malzemelerin mikroyapıları (c ve d)

Şekil 5.13' te çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin çekme deneyi sonrası kırık yüzeyleri görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta fiberlerle matris arasındaki bağın kuvvetli olmamasından dolayı fiberlerin matristen kolayca ayrıldığı görülmüştür. Diğer bir önemli nokta ise matris üzerinde parlak yüzeylerin meydana gelmesidir. Bu da matrisin taneler arası kırıldığını göstermektedir. Fiberlerin sünek bir şekilde kırıldığı açıkça görülmektedir.

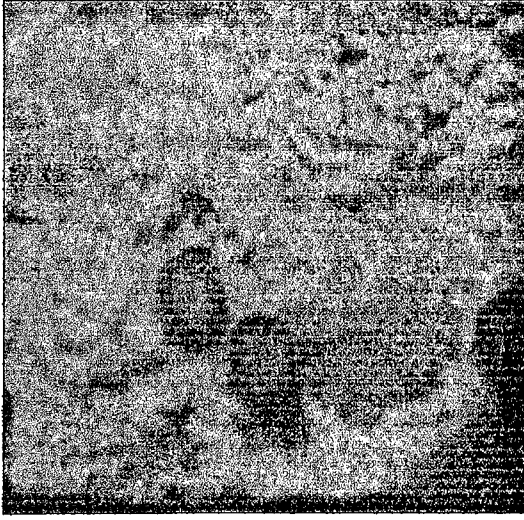
Şekil 5.14 ise tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin çekme deneyi sonrası kırık yüzeylerini göstermektedir. Çift yönlü de olduğu gibi matris üzerindeki parlak yüzeyler taneler arası kırılmanın bir delilidir. Ayrıca fiberlere dik yönde uzanan tabakanın, başlangıçta iki parça olarak konulup ergitilen matris alaşımının birleşme yüzeyi olduğu söylenebilir. Yine sünek bir şekilde kırılmış olan fiberler açıkça görülmektedir.



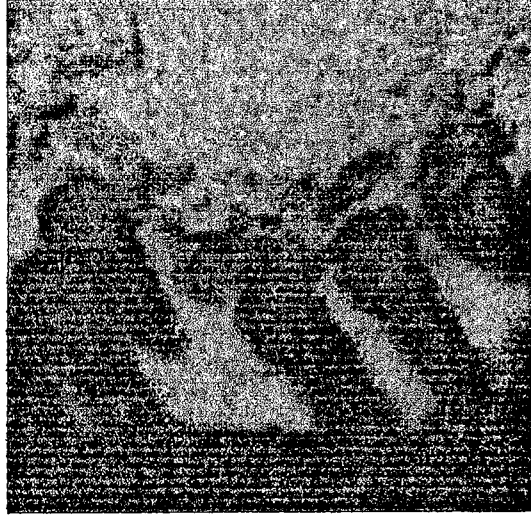
**Şekil 5.13 Çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin kırık yüzeyleri
(Büyütme X 125)**



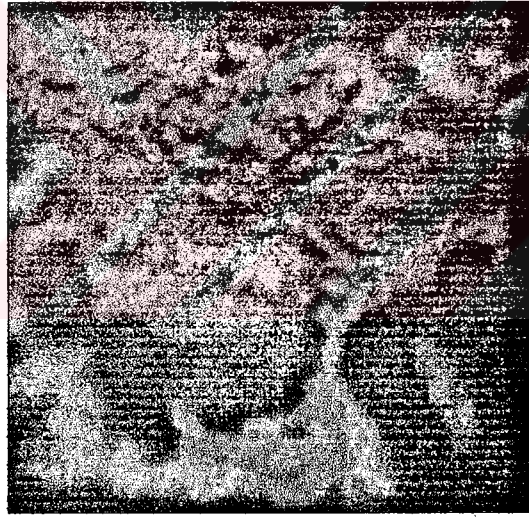
**Şekil 5.14 Tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin kırık yüzeyleri
(Büyütme a X 50, b X 80)**



(c)



(d)



(e)

**Şekil 5.14 Tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin kırık yüzeyleri
(Büyütme c, d ve e X 125)**

BÖLÜM VI

TARTIŞMA

6.1 Düzenek ve Üretim

Sıkıştırılmış döküm için temel olarak yapılan işlemler Bölüm 2.3' te de anlatıldığı gibi şu şekildedir;

- 1- Önceden belirlenmiş miktarda iş malzemesinin ergitilmesi, düzeneğin bütün temas yüzeylerinin yağlanması ve düzeneğin ön ısıtılması.
- 2- Direkt bir şekilde veya besleme yolundan geçerek kalıp oyuğu içine sıvı metalin boşaltılması.
- 3- Kalıbın kapatılması ve katılma tamamlanana kadar basınç uygulanması.
- 4- Dökümün çıkarılması, düzeneğin temizlenmesi ve ocağın yeniden şarj edilmesi (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Rajagopal, 1981).

Bununla beraber,bizim yaptığımız sıkıştırılmış döküm işlemi zorunluluk gereği şu farklılıklarla yapılmıştır;

(i) İş malzemesinin ergitilerek kalıp oyuğu içine boşaltılması yerine iş malzemesi önce indüksiyon ocağında ergitilmiş ve kokil kalıplara dökülmüştür. Buradan gereksinim duyulduğu kadarı alınarak kalıpla beraber fırın içerisinde tekrar ergitilmiştir.

(ii) Genel olarak sıkıştırılmış döküm düzenekleri Bölüm 2.5.5' te de anlatıldığı gibi 200-300 °C aralığında ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Oysa bizim yaptığımız sıkıştırılmış döküm işleminde iş malzemesi kalıpla beraber fırının içerisinde konularak 660 °C' de ergitilmiştir. Rajagopal' a göre 150 °C' nin altındaki düşük sıcaklıklar

kalıplarda termal yorulma hatalarını ve aynı zamanda döküm yüzeyi üzerinde soğuk katlanmalara neden olmaktadır. 400 °C' nin üzerindeki çok yüksek kalıp sıcaklıkları ise sıcak noktalar ve döküm içinde büzülme gözeneklerine sebep olabilir (Rajagopal, 1981). Bu durumda yaptığımız sıkıştırılmış döküm işleminin sonucunda bir miktar büzülme gözenekliliğine rastlamak olasıdır.

(iii) Ayrıca Bölüm 2.5.6 ve 2.5.8' de anlatıldığı gibi basınç uygulamasından önceki bekleme zamanı ile basınç seviyesi ve süresi çok önemlidir. Basınç sıvı metale sıfır akıcılık sıcaklığının (solidüs ile liküdüs sıcaklıklarının orta noktası) yakınında uygulanmalıdır. Bu da alüminyum alaşımları için 10-20 s' lik bir basınç uygulamasından önceki bekleme zamanına karşılık gelmektedir. Rajagopal' a göre 70-105 MPa arasında (Rajagopal, 1981), Ghomashchi ve Vikrov' a göre 50-150 MPa arasında (Ghomashchi & Vikhrov, 2000) bir basınç seviyesi sıkıştırılmış döküm için gereklidir. Ayrıca artan basınç ile, tane incelmesi ile beraber daha yüksek mekanik özellikler sağlandığı bilinmektedir. Bu iki faktör de hidrolik presin önemini göstermektedir. Yaptığımız çalışmada hidrolik presin hızının çok yavaş olması sebebiyle basınç zamanında uygulanamadığından iş malzemesinin kalıpla beraber tekrar ergitilmesine karar verilmiş, bu aşamada da 45 s' lik bir basınç öncesi gecikme zamanı ortaya çıkmıştır. Ayrıca Şekil 4.1' de görülen deney düzeneğinde çelik telleri düzgün bir şekilde sıralamak için kullanılan paslanmaz çelik levhalar arasından erimiş metalin çok fazla sızması nedeniyle basınç tam olarak uygulanamamış veya başka bir ifade ile tam olarak kapalı bir alan oluşturulamadığından hidrostatik basınç sağlanamamıştır.

6.2 Mekanik Özellikler

Sıkıştırılmış döküm tekniği ile üretilen malzemelerin geleneksel döküm yöntemleriyle üretilen malzemelere göre daha yüksek mekanik özellikler sergilediği genel olarak kabul görmüştür. Bunun nedeni ise uygulanan yüksek basıncın eriyik içerisinde hapsolan gazları tutması ve hızlı ısı çıkışı ile ince mikroyapı için döküm ile kalıp arasında teması arttırmasıdır (Rajagopal, 1981).

Sıkıştırılmış döküm tekniği takviyesiz metal alaşımlarına uygulandığı gibi metal matris kompozitleri için de bugün çok popüler bir imalat yöntemidir. Bunun başlıca nedenleri artırılmış mekanik özellikleri, büzülme ve gaz gözenekliliklerinin giderilmesi ve kusursuz yüzey bitimi avantajlarının olmasıdır (Ghomashchi & Vikhrov, 2000; Kang et al., 1993; Song et al., 1995).

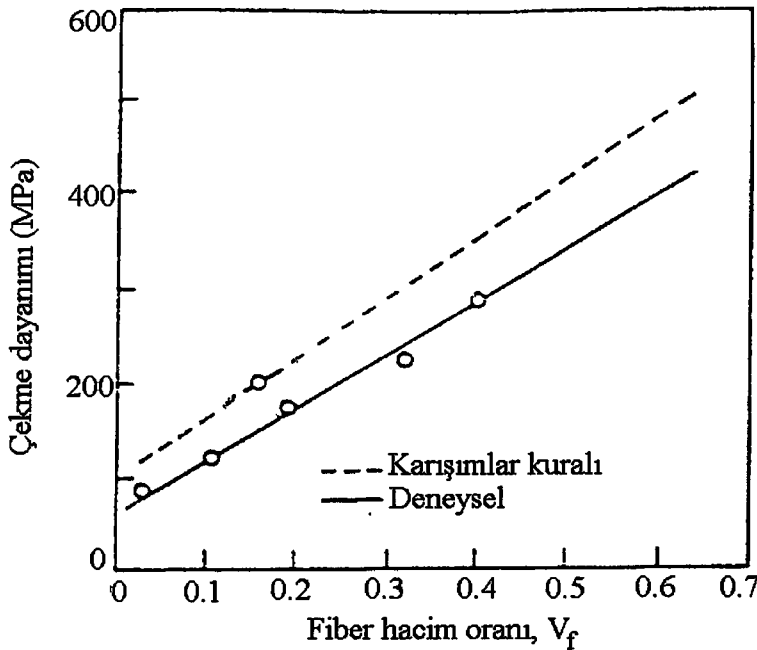
Bunların yanında, metal matris kompozitleri kendilerinin matris alaşımlarına göre çok daha iyi fiziksel ve mekaniksel özelliklere sahiptir (Kang et al., 1993). Yüksek dayanım ve elastiklikleri, boyutsal kararlılıkları, yüksek aşınma ve yorulma dirençleri, yüksek termal iletkenlikleri ve yüksek sıcaklıklarda kararlılıkları ile metal matris kompozitleri çok büyük ilgi görürler (Badini et al., 2000; Lianxi et al., 1995).

Yapılan deneysel çalışmada sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretilen takviyesiz matris malzemesi, çift yönlü fiber takviyeli ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerinin mekanik değerleri Tablo 5.1-5' te verilmiştir. Buradan açıkça görülmektedir ki çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeler takviyesiz matris malzemesinin değerlerine bile ulaşamamıştır. Bunun nedeni ise oluşan kaba primer α Al taneleri, tane sınırlarında çökelen Si taneleri ve çelik teller ile alüminyum matris arasında kalın bir reaksiyon tabakasının oluşumudur. Tüm bu sebeplerin malzemenin gevrek bir şekilde kırılmasına yol açtığı incelenen kırılma yüzeylerinden de anlaşılmaktadır. Ayrıca Tablo 5.6' dan görüldüğü gibi çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin sertlik değerleri takviyesiz matris malzemesinden ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerden daha yüksek değerlere sahiptir. Yine Tablo 5.6' dan en uygun tavlama sıcaklığının 350 °C olduğu görülmüştür. Tablo 5.7 ise yine çift yönlü kompozit malzemelerin yapısında diğer takviyesiz matris malzemelerine ve tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerine oranla daha yüksek porozite oluştuğunu açıkça göstermektedir. Bunun nedeni ise bir önceki bölümde de anlatıldığı gibi aşırı yüksek kalıp ön ısıtma sıcaklığıdır.

Tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerin deneysel sonuçları, teorik değerleri ile karşılaştırıldığında (Tablo 5.1-5) birbirlerine çok yakın değerlerde olduğu açıkça görülmektedir. Bunun nedeni ise tek yönlü fiber takviyeli kompozit

malzemelerin, çift yönlü fiber takviyeli kompozit malzemelerden daha ince tane yapısına ve az da olsa reaksiyon tabakasına sahip olmaları, ayrıca Tablo 5.7' de görüldüğü daha az poroziteye sahip olmalarıdır.

Bu konu üzerine Bhagat yaptığı çalışmada, kompozitlerin çekme dayanımlarının artan fiber hacim oranı ile nasıl değiştiğini göstermiştir, (Şekil 6.1). Bu çalışmadaki değerler kalıp ön ısıtma sıcaklığının 550 °C , metal döküm sıcaklığının 850°C ve basıncın 110 MPa olduğu değerler için bulunmuştur. Matris olarak Al-0,7 Mg-0,6 Si-0,8 Mn-0,4 Fe alaşımı ve takviye olarak 0,3 mm çapında 304 tipi paslanmaz çelik teller kullanılmıştır. Şekil 6.1' teki kesikli çizgi, Denklem (3.32) ile verilen karışımlar kuralıyla bulunan değerleri göstermektedir. Deneysel olarak bulunan sonuçlar, karışımlar kuralı ile bulunanlardan bir parça daha düşüktür. Bu, temel olarak çekme yüklemesi altında fiberin matris içinden sıyrılması şeklinde açıkça gösterilen yetersiz fiber/matris bağının bir sonucudur. Bütün sıkıştırılmış döküm kompozitleri fiberin matris içinden sıyrılması şeklinde gerilme altında hasara uğramaktadır. (Bhagat, 1988). Burada değinilmesi gereken nokta tek yönlü fiber takviyeli kompozit malzemeler için bulunan deneysel sonuçların, karışımlar kuralı ile bulunan sonuçlardan daha yüksek çıkmasıdır.



Şekil 6.1 Paslanmaz çelik tel takviyeli alüminyum matris kompozitlerinin çekme dayanımlarının fiber hacim oranı ile değişimi (Bhagat, 1988)

Bu konu üzerine Ochiai ve Osamura tarafından yapılan diğer bir çalışmada (Ochiai & Osamura, 1990), tek yönlü metal matris kompozitlerinin çekme dayanımları üzerine matris düktilitesinin, arayüzey bağlanma dayanımının ve fiber hacim oranının etkilerini incelemişlerdir. Bu çalışmada bulunan sonuçlar şöyledir:

- (1) Kuvvetli bir şekilde bağlanmış kompozitlerin dayanımı artan matris düktilitesi ile artmış ve sonra yaklaşık olarak sabit kalmıştır.
- (2) Matris düktil olduğu zaman, kompozit dayanımı artan arayüzey bağlanma dayanımı ile artmış ve sonra yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Matris düktil olmadığı zaman ise, dayanım artmış ama sonra arayüzey bağlanma dayanımı ile azalmıştır. Bu durumda, kompozit dayanımının maksimum olması için optimum bir bağlanma dayanımı vardır.
- (3) Kompozitlerin dayanımına fiber hacim oranının etkileri şu şekildedir:
 - a) Dayanım, karışımlar kuralı ile yaklaşık olarak bulunabilen artan fiber hacim oranı ile doğrusal olarak artmaktadır.
 - b) Düşük fiber hacim oranı için, dayanım karışımlar kuralı ile bulunabilir, ancak yüksek hacim oranı için, bu kuraldan sapma göstermektedir.
 - c) Fiber hacim oranının her aralığında, dayanım artan fiber hacim oranıyla doğrusal olarak artar, ancak karışımlar kuralına temel olan ifade ile karşılaştırıldığında çok düşüktür.

6.3 Arayüzey Reaksiyonları ve Mikroyapı

Bir çok metal matris kompozitleri, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında fiber/matris arayüzeyinde kimyasal reaksiyon oluşur. Bu arayüzey kimyasal reaksiyonu kompozitlerin dayanımındaki azalmanın sebeplerinden biri olarak bilinir. Reaksiyona bağlı olarak bu azalmanın ölçümü için çeşitli mekanizmalar bulunmaktadır. Reaksiyon tabakası bir çok durumda gevrek, tabaka küçük uzamalarda kırılır ve çentik rolü oynar. Kompozitlerin dayanımı, reaksiyon tabakasının artan kalınlığı ile azalmaktadır, ve ani şekilde kırılma görülmektedir (Ochiai & Osamura, 1987).

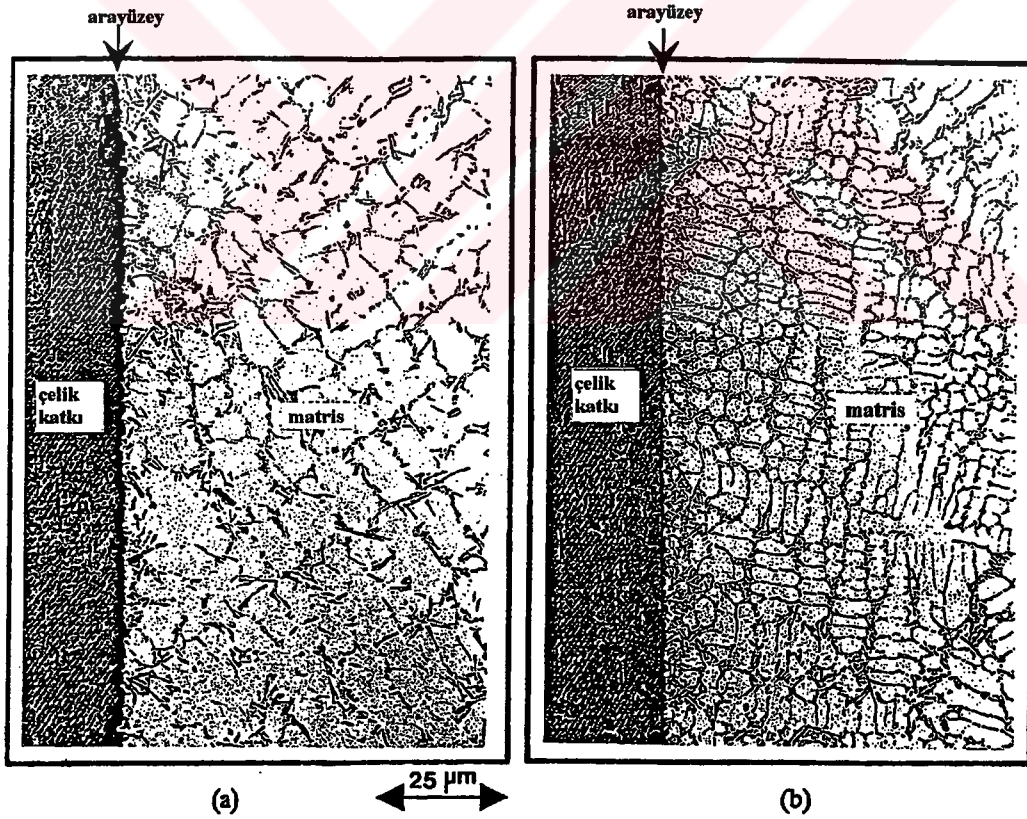
Bhagat yaptığı çalışmalar sonucunda paslanmaz çelik tel takviyeli alüminyum matris kompozitlerinde fiber ve matris arasındaki arayüzey reaksiyonunun arzu edilenden daha fazla olduğunu ve göreceli olarak zayıf bir arayüze sahip olduğunu gözlemiştir. Aynı zamanda, fiber ve matris arasındaki reaksiyonun düzgün olmadığını bulmuştur. Fiberlerin bir kısmının kuvvetli bir şekilde erimiş alüminyum matris ile tepkime verdiğini, diğerlerinin yetersiz bir şekilde tepkime verdiğini görmüştür. Aynı incelemeler, genel olarak alüminyum alaşımlı matris kompozitleri için doğrudur. Reaksiyon ürünlerinin alüminyum matrisin içine doğru derinleştiği ve alüminyum alaşım matrisinde daha da derin olduğu bulunmuştur (Bhagat, 1988).

Fiber-matris arayüzeyinde matris ve fiber arasındaki reaksiyonun sonucu olarak Fe_xAl_y tipi intermetalik bileşikler paslanmaz çelik takviyeli alüminyum matris kompozitlerinin üretimi sırasında oluşmaktadır. Fiberlerin dayanımlarını azaltmaları ve fiber/matris arayüzeyini aşırı şekilde gevrekletmeleri nedeniyle bu bileşiklerden herhangi birinin aşırı miktarda oluşması istenmemektedir. Böylece, sıcaklığın, basıncın ve zamanın uygun bir kontrolü, fiber ve matris arasında iyi bir metalurjik bağlanmanın sağlanması için önemlidir. Yüksek sıcaklığın zararlı etkileri, aynı basınç şartları altında daha uzun periyotlarla karşılaştırıldığında daha şiddetli olduğu söylenebilir. Bununla beraber, arayüzey içinde çeşitli bileşiklerin varlığı, tamamen giderilemez. Üretim parametreleri, dış yükleme altında kompozitlerin vaktinden önce hasara uğramasına sebep olmayacak ve bu bileşiklerin varlığı en aza indirilecek şekilde seçilmelidir (Bhagat, 1985).

Deneysel olarak bulunan Fe_xAl_y tipi intermetalik bileşiklerden bazıları ve bunların Vickers sertlik değerleri (Hv) şöyledir: Fe_3Al (400), $FeAl$ (700), Fe_2Al_5 (900), $FeAl_2$ (1050), $FeAl_3$ (1000) ve $FeAl_7$ (1100) (Bhagat, 1988).

Kang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, çelik takviyenin A357 matrisinin arayüzey bölgesindeki mikroyapılarını Şekil 6.2' de göstermiştir. Yüksek bir kalıp sıcaklığı ile basınç öncesi uzun bir gecikme zamanına sahip Şekil 6.2 (a)' daki malzeme, bir dentritler arası Al/Si ötektiği ile kaba primer Al dentritlerinden oluşan sıkıştırılmış döküm matris mikroyapısını göstermektedir. Çelik takviye-matris

arayüzeyinde bulunan ince siyah bir reaksiyon bölgesi uzun süre yüksek sıcaklıkta kalmış olan çelik takviyeler tarafından oluşturulmuştur. Arayüzeyin dayanımı, boylamsal eksen boyunca ilk bölünen sıkıştırılmış döküm ingotu tarafından tayin edilmiştir. Takviyenin ingottan kolaylıkla ayrıldığı bölünmeden sonra oldukça iyi bir şekilde tayin edilmiştir. Arayüzey reaksiyonu, çelik takviye ve matris arasında çok zayıf bir bağ üretir, şöyle ki, takviye ingotun ayrılmasından sonra bozulmuştur. Daha düşük kalıp ön ısıtma sıcaklığıyla daha kısa basınç öncesi gecikme zamanına sahip Şekil 6.2 (b)' deki iki malzeme arasında daha kuvvetli bir bağa karşılık gelen takviye matris arayüzeyinde daha az reaksiyon olduğu görülmektedir. Çelik takviye yakınındaki matris mikroyapısı, eriyiğin daha etkili basınçlandığını işaret eden ince boyutlu Al dentritik yapısını göstermektedir (Kang et al., 1993).



Şekil 6.2 Çelik takviye ve A357 matrisinin arayüzey bölgesindeki mikroyapıları (a) Kalıp ön ısıtma sıcaklığı 480 °C ve basınç öncesi gecikme süresi 70 s, basınç 100 MPa (b) Kalıp ön ısıtma sıcaklığı 290 °C ve basınç öncesi gecikme süresi 18 s, basınç 100 MPa (Kang et al., 1993)

Burada yaptığımız çalışmadaki sonuçlar, Bhagat ile Kang ve arkadaşlarının buldukları sonuçlarla uyum içindedir. Şekil 5.8-12' deki kalın arayüzey tabakaları ile Şekil 6.2 (a)' daki arayüzey tabakası uyum içindedir. Bu durumda yüksek kalıp sıcaklığı, tellerin uzun süre yüksek sıcaklıkta kalması ve uzun basınç öncesi gecikme zamanının kalın bir arayüzey tabakası oluşturduğu söylenebilir. Bu kalın arayüzey tabakası gevrek olduğundan kompozitlerin dayanımlarını önemli oranda azaltmıştır.

İkinci olarak yapılan deneysel çalışmada ortaya çıkan kaba primer α Al taneleri ve tane sınırlarında çökelen Si tanelerinin de gevreklik yarattığı söylenebilir. Bu durum, en iyi şekilde kırık yüzeylerinin incelenmesi sırasında görülmektedir. Matris üzerinde ortaya çıkan parlak yüzeyler matrisin taneler arası kırıldığını gösteren en önemli delildir. Ayrıca fiber teller ile matris arasında kuvvetli bir bağın olmaması sebebiyle fiberlerin matristen kolay bir şekilde ayrılmış olduğu da görülmektedir. Diğer bir konu da iki parça halinde konularak ergitilen matris alaşımının birleşme yüzeylerinde oksit oluşumuyla kesitin zayıfladığının açıkça belli olmasıdır.

Son olarak tane yapısının bölgesel farklılıklar göstermesi de en azından kalıbın homojen olarak ısıtılıp, soğumanın ve dolayısıyla katılaşmanın kısaca deney şartlarının homojen olmadığını göstermektedir. İnce mikroyapılı olan bölgelerin daha soğuk, kaba mikroyapılı olan bölgelerin ise daha sıcak olduğu söylenebilir.

BÖLÜM VII

SONUÇ

7.1 Sonuç

Takviyesiz Al matris alaşımının ve %10 hacim oranlarındaki çift ve tek yönlü çelik fiber takviyeli Al matris kompozitlerinin sıkıştırılmış döküm yöntemi ile üretimi yapılmıştır.

Çekme deneyi, Iosipescu deneyi, 30° lik çekme deneyi, basma deneyi, termal genleşme katsayılarının belirlenmesi çalışmaları, sertlik deneyi ve yoğunluk deneyi yapılarak malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiş ve mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda çift yönlü çelik fiber takviyeli alüminyum matris kompozitlerinin takviyesiz matris alaşımının değerlerine bile ulaşmadan hasara uğradığı, oysa tek yönlü çelik fiber takviyeli Al matris kompozitlerinin teorik değerlerine ulaştığı görülmüştür.

Mikroyapısal incelemeler sonucunda takviyesiz matris alaşımının dentritik yapıda olduğu görülmüştür. Çift yönlü çelik fiber takviyeli kompozitlerin kaba primer α Al tanelerinden oluştuğu ve tane sınırlarında Si tanelerinin ince çubuklar şeklinde çökelediği, ayrıca çelik takviyeler ile matris arasında kalın bir arayüzey tabakasının oluştuğu ve tüm bunlarında gevrekliğe yol açarak malzemenin beklenenden önce hasara uğramasına yol açtığı görülmüştür. Tek yönlü çelik fiber takviyeli Al matris kompozitlerinin ise çift yönlü olanlarına göre daha ince alüminyum tanelerinden oluştuğu ve daha ince bir arayüzey tabakasına sahip olduğu görülmüştür.

Tanelerin beklenenden daha büyük olması, Si tanelerinin tane sınırlarında çökmesi ve yoğunluk hesaplamaları sonucunda bulunan yapıda mevcut porozitenin sebebi olarak aşırı yüksek kalıp ön ısıtma sıcaklığı gösterilebilir. Ayrıca arayüzey tabakasının da kalın olmasının başlıca nedeni olarak da çelik fiberlerin uzun süre yüksek sıcaklıkta kalması ve uzun basınç öncesi gecikme zamanı gösterilebilir.

Son olarak mikroyapı incelemeleri sonucunda tane yapılarının bölgesel farklılıklar içerdiği bunun sebebinin de deney şartlarının homojen olmamasından kaynaklandığı bulunmuştur.

Kalıbın ön ısıtılması ayrı bir düzeneğe yapıp matris alaşımının kalıba dökülmesi sağlandıktan sonra hareket hızı daha yüksek bir pres kullanılarak daha iyi sonuçlar alınabileceği açıkça görülmektedir. Ayrıca çelik fiberlerin düzgün bir şekilde sıralanmasını sağlayan paslanmaz çelik levhaların da sızdırma olmayacak veya en az olacak şekilde geliştirilmesi şarttır.

KAYNAKLAR

Badini, C., Fino, P., Musso, M. & Dinardo, P. (2000). Thermal fatigue behaviour of a 2014/Al₂O₃-SiO₂ (Saffil fibers) composite processed by squeeze casting. Materials Chemistry and Physics, 64, 247-255

Baron, R. P., Jones, C., Wawner, F. E. & Wert J.A. (1999). Mechanical properties of aluminum matrix composites reinforced with sintered ferrous compacts. Materials Science and Engineering, A259, 308-313

Bhagat, R. B. (1988). High pressure squeeze casting of stainless steel wire reinforced aluminum matrix composites. Composites, 19, 393-399

Bhagat, R. B. (1985). The effects of hot pressing parameters on the strength of aluminum/stainless steel composites. Metallurgical Transactions A, 16A, 623-628

Boland, F., Colin, C., Salman, C. & Delannay, F. (1998). Tensile flow properties of Al-based matrix composites reinforced with a random planar network of continuous metallic fibres. Acta mater., 46, 6311-6323

Chen Z. W. & Thorpe, W. R. (1996). The effect of squeeze casting pressure and iron content on the impact energy of Al-7Si-0.7Mg alloy. Materials Science and Engineering, A221, 142-153

Cho, W. G. & Kang, C. G. (2000). Mechanical properties and their microstructure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys. Journal of Materials Processing Technology, 105, 269-277

- Clyne, J. W. & Mason, J. F. (1987). The squeeze infiltration process for fabrication of metal-matrix composites. Metallurgical Transactions A, 18A, 1519-1530
- Ghomashchi, M. R. & Vikhrov, A. (2000). Squeeze casting: an overview. Journal of Materials Processing Technology, 101, 1-9
- Hall, I. W. & Manrique, F. (1995). Surface treatment of carbon fibers for aluminum alloy matrix composites. Scripta Metallurgica et Materialia, 33, 2037-2043
- Jones, R. M. (1999). Mechanics of composite materials (2th ed.). USA: Taylor & Francis Inc.
- Kaczmar, J. W., Pietrzak, K. & Wlosinski, W. (2000). The production and application of metal matrix composite materials. Journal of Materials Processing Technology, 106, 58-67
- Kang, C. G., Choi, J. S. & Kang, D. W. (1998). A filling analysis of the forging process of semi solid aluminum materials considering solidification phenomena. Journal of Materials Processing Technology, 73, 289-302
- Kang, C. G. & Seo, Y. H. (1996). The influence of fabrication parameters on the deformation behaviour of the preform of metal-matrix composites during the squeeze-casting process. Journal of Materials Processing Technology, 61, 241-249
- Kang, H. G., Zhang, D. L. & Cantor, B. (1993). The microstructures of locally reinforced squeeze-cast Al-alloy metal-matrix composites. Journal of Microscopy, 169, 239-245
- Lee, J. H., Won, C. W., Cho, S. S., Chun, B. S. & Kim, S. W. (2000). Effects of melt flow and temperature on the macro and microstructure of scroll compressor in direct squeeze casting. Materials Science and Engineering, A281, 8-16

- Lianxi, H., Shoujing, L., Wencan, H. & Wang, Z. R. (1995). Development of the technique of extrusion directly following infiltration for the manufacturing of metal-matrix composites. Journal of Materials Processing Technology, 49, 287-294
- Lim, C. S. & Clegg, A. J. (1997). The production and evaluation of metal-matrix composite castings produced by a pressure-assisted investment casting process. Journal of Materials Processing Technology, 67, 13-18
- Lim, S. & Nishida, Y. (1995). Superplasticity of whisker reinforced 2024 aluminum alloy composites fabricated by squeeze casting. Scripta Metallurgica et Materialia, 32, 1911-1915
- Liu, J., Wang, S., Shi, Z. & An, G. (1997). A new process for the fabrication of in-situ particle reinforced metal matrix composites. Journal of Materials Processing Technology, 63, 354-357
- Nam, H. W., Aggag, G. A., Takahashi, K. & Han, K. S. (2000). The dynamic behaviour of metal-matrix composites under low-velocity impact. Composite Science and Technology, 60, 817-823
- Nicolaou, P. D., Semiatin, S. L. & Goetz, R. L. (1996). An experimental and theoretical investigation of the rapid consolidation of continuously reinforced, metal-matrix composites. Metallurgical and Materials Transactions A, 27A, 1719-1730
- Ochiai, S. & Osamura, K. (1987). A computer simulation of strength of metal matrix composites with a reaction layer at the interface. Metallurgical Transactions A, 18A, 673-679
- Ochiai, S. & Osamura, K. (1990). Influences of matrix ductility, interfacial bonding strength, and fiber volume fraction on tensile strength of unidirectional metal matrix composite. Metallurgical Transactions A, 21A, 971-977

- Owen, D. R. J. & Hinton, E. (1980). Finite elements in plasticity. Pineridge Press Limited
- Papworth, A. & Fox, P. (1996). Oxide film casting defects in squeeze cast metal matrix composites. Materials Letters, 29, 209-213
- Rajagopal, S. (1981). Squeeze casting: a review and update. J. Applied Metalworking, 1, 3-14
- Skalianos, S. M., Kiourtsidis, G. & Xatzifotiou, T. (1997). Effect of applied pressure on the microstructure and mechanical properties of squeeze-cast aluminium AA6061 alloy. Materials Science and Engineering, A231, 17-24
- Song, J. I., Bong, H. D. & Han, K. S. (1995). Characterization of mechanical and wear properties Al/Al₂O₃/C hybrid metal matrix composites. Scripta Metallurgica et Materialia, 33, 1307-1313
- Takahashi, K. & Chou, T. W. (1988). Transverse elastic moduli of unidirectional fiber composites with interfacial debonding. Metallurgical Transactions A, 19A, 129-135
- Xiandong, S., Chengping, L., Zhuoxuan, L. & Liuzhang, O. (1997). The fabrication and properties of particle reinforced cast metal matrix composites. Journal of Materials Processing Technology, 63, 426-431
- Yue, T. M. (1997). Squeeze casting of high-strength aluminium wrought alloy AA7010. Journal of Materials Processing Technology, 66, 179-185
- Yue, T. M. & Chadwick, G. A. (1996). Squeeze casting of light alloys and their composites. Journal of Materials Processing Technology, 58, 302-307