

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MAKİNA FAKÜLTESİ**

**ELYAF TAKVİYELİ
KARMA MALZEMELER
Ders Notları**

Prof. Dr. Ahmet ARAN

İstanbul, 1990

Prof. Dr. AHMET ARAN

ELYAF TAKVİYELİ
KARMA MALZEMELER

İÇİNDEKİLER	SAYFA
1. GİRİŞ.....	1
2. MATRİS MALZEMELERİ.....	6
2.1. Plastik Matris Malzemeleri.....	6
2.2. Metal Matris Malzemeleri.....	10
3. ELYAF TÜRLERİ.....	12
3.1. Cam Elyaf.....	12
3.2. Bor Elyaf.....	14
3.3. Aramid Elyaf.....	16
3.4. Karbon Elyaf.....	17
3.5. Yüksek Sıcaklık Elyafı.....	19
3.6. Kılcal Kristaller.....	19
4. ETKM ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	21
4.1. reçine Matrisli KM'lerin Üretimi.....	21
4.2. Metal Matrisli KM'lerin Üretimi.....	27
5. ELYAF TAKVİYELİ KARMA MALZEMELERİN MEKANİĞİ.....	32
5.1. Mikromekanik.....	32
5.2. Makromekanik.....	50
6. BAZI ETKM'LERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI.....	77
6.1. Cam Elyaf Takviyeli Plastikler.....	78
6.2. Karbon Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler.....	80
6.3. Bor Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler.....	82
6.4. Kevlar Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler.....	84
6.5. Metal Elyaf Takviyeli Karma Malzemeler.....	87
7. ÜRETİM KUSURLARI VE TAHRİBATSIZ KONTROL YÖNTEMLERİ... ..	89
7.1. Üretim Kusurları.....	90
7.2. Tahribatsız Kontrol Yöntemleri.....	91
YARARLANILAN KAYNAKLAR.....	95

i.T.Ü. Yüksek Lisans programının Makina Anabilim Dalı kapsamında anlatılan Karma Malzeme dersinin elyaf takviyeli kompozitlerle ilgili kısımlarını içeren bu ders notları değişik kaynaklardan derlenerek hazırlanmış ve dersin kapsamı özellikle makina mühendislerinin konstrüksiyon ve imalatta yararlanacağı bilgileri içerecek şekilde sınırlandırılmıştır.

Yararlı olmasını dilerim.
Gümüşsuyu 1990

A.Aran

BÖLÜM 1

G İ R İ Ş

Malzemeler genellikle metaller, seramikler ve organik malzemeler olarak üç ana gruba ayrılırlar. Bu üç grubun birbirlerine göre üstün ve zayıf yönleri vardır, Çizelge 1.1. Dayanım ve tokluk özellik çiftinin en uygun olduğu grup olan metaller makina mühendisliğinde en yaygın olarak kullanılan malzeme türüdür.

Bu üç ana grubun yanında, aynı ya da farklı gruplardan iki ya da daha fazla malzemenin uygun olan özelliklerini tek malzeme toplamak, ya da yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesi ile oluşturulan malze-

Çizelge 1.1: Metal, seramik ve plastik malzemelerin bazı özelliklerinin karşılaştırılması

Malzeme Grubu	Yoğunluk	Dayanım	Tokluk	Isıl kararlılık	Biçimlendirme	Birleştirme
METALLER	orta yüksek	orta	iyi	orta	orta	orta
SERAMİKLER	düşük yüksek	yüksek	düşük	yüksek	kötü	kötü
PLASTİKLER	düşük	düşük	düşük	düşük	iyi	iyi

meler, karma malzemeler (kompozitler) olarak adlandırılırlar. Atomsal veya molekülseel düzeyde birleştiren malzemeler (örneğin alaşımlar) makroskopik olarak homojen olduklarından karma malzeme olarak sınıflandırılmazlar.

Karma malzemelerin avantajı bileşenlerinin en iyi özelliklerini biraraya getirmesidir. Karma malzemelerin üretimiyle aşağıdaki özelliklerin biri veya birkaçının geliştirilmesi amaçlanır:

- Dayanım
- Yorulma dayanımı
- Aşınma dayanımı
- Korozyon dayanımı
- Kırılma tokluğu
- Yüksek sıcaklık özellikleri
- Isıl iletkenlik
- Elektrik iletkenliği
- Akustik iletkenlik
- Rijitlik
- Ağırlık
- Fiat
- Estetik görünüm v.s.

Bu sayılan özelliklerin hepsi aynı anda iyileşmez ve zaten buna gerek de yoktur. Bileşenlerinin özellikleri bilinen bir karma malzemenin, bazı özellikleri hesaplanarak bulunabilir (yoğunluk, elastik özellikler vb.). Bazı özellikler için ise bu mümkün değildir (yorulma dayanımı, tokluk vb.). Tasarımcı bu durumda emniyetli davranarak emniyet katsayılarını çok yüksek seçmek zorunda kalır ve karma malzeme kullanımı ekonomik olmaktan çıkabilir.

Günümüzde çok gelişmiş olan bu malzemeler, aslında binlerce yıldan beri kullanılmaktadır. Örneğin çamur içine karıştırılan saman çöpleri ile yapılan kerpiç, bir karma malzemedir. Ok yayı yapılırken üst üste konulan, özellikleri ve lif yönleri farklı ağaç levhalar karma bir malzeme oluştururlar. Ayrıca karma malzemeler doğada da değişik biçimlerde bulunmaktadır (ahşap malzemeler, kemik v.s.).

Karma malzeme üretiminin bilinçli olarak ele alınması ve bilimsel yaklaşımlarla yeni malzemelerin geliştirilmesi ancak 1940'lı yıllarda cam takviyeli plastiklerin kullanımı ile başlamıştır. Önemli ilk uygulamalara örnek olarak radar kubeleri gösterilebilir. Cam takviyeli plastikler elektromanyetik geçirgenlik, hafiflik, atmosfer koşullarına dayanıklılık ve mekanik özellikleri nedeniyle bu amaç için kullanılanlabilecek en uygun malzemedir. İlk CTP tekne 1942'de yapılmış, ilk elyaf sarma patenti ise 1946'da A.B.D.'de alınmıştır. 1950'lerde ise uçak pervaneleri karma malzemedен yapılmaya başlanmıştır. Bugün uçak endüstrisinde % 30'a varan oranlarda kullanılan karma malzemelere örnek olarak, çeşitli polimerler (plastikler) içerisine gömülmüş karbon lifleri, alüminyum içerisine dizilmiş boron lifleri veya 1000° C üzerindeki sıcaklıklarda çalışan ve nikel-alüminyum alaşımı içerisinde oluşturulmuş nikel-niobiyum levhaları ile kuvvetlendirilen malzemeler gösterilebilir. Bu üstün nitelikli karma malzemelerin yanında ucuzluğu ve elde edilmesi oldukça kolay olan cam elyaf-polyester (CTP) malzeme oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Verilen örneklerden de anlaşılacağı üzere kullanılacak karma malzeme istenen mekanik özellikler, çevre şartlarına dayanıklılık, görünüm, maliyet vb. özellikler ile çok çeşitli olabilmekte ve hemen hemen her şartı karşılayabilecek uygun bir takviye-matris çifti oluşturulabilmektedir.

Bu malzeme grubu hava ve uzay endüstrileri yanında kara ve deniz taşımacılığı, çeşitli spor malzemeleri (yüksek atlama sıırıkları, bisiklet, tenis, sörf, yat ve yarış tekneleri v.s.), tıp gereçleri, robot yapımı (eylemsizlikleri az ve rijit olduklarından), kimya sanayi (korozyona dayanıklı olduklarından), elektroteknik ve elektronik (yalıtkan olduklarından) ve müzik aletleri yapımı gibi birçok uygulama sahası bulmuş durumdadır. Sıralanan bu uygulamalarda karma malzemeler geleneksel bazı malzemelerle yarış halindedirler. Çizelge 1.2'de karma malzemeler geleneksel malzemelerle mekanik özellikleri bakımından karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 1.2: Bazı karma ve geleneksel malzemelerin mekanik özellikler bakımından karşılaştırılması

Malzeme	Çekme		Elastiklik		Özgül çekme		Özgül Elast.	
	Yoğunluk	dayanımı	modülü	dayanımı	Modülü	σ_c/ρ	E/ρ	
	g/cm ³	MPa	GPa					
Alaşımsız çelik	7,9	459	203			58	26	
Alüminyum	2,8	84	71			30	25	
Al alaşımı 2024	2,8	247	69			88	25	
Pirinç	8,5	320	97			38	11	
Ahşap (kayın)	0,7	110	13			157	19	
Kemik	1,8	138	26			75	14	
Bor-Epoksi KM	1,8	1600	224			889	124	
Karbon (YM)								
-Epoksi KM	1,8	1260	218			788	136	
Karbon (YD)								
-Epoksi KM	1,5	1650	140			1100	93	
Kevlar								
-Epoksi KM	1,4	1400	77			1000	55	
S camı								
-Epoksi KM	1,8	1400	58			824	33	
E camı								
-Epoksi KM	1,8	1150	42			639	23	

Karma malzeme oluşturma seçenekleri sonsuzdur; dolayısıyla bunları sınıflandırmak da oldukça güçtür. Burada sadece makina mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan türler üzerinde durulacaktır.

Sınıflandırma değişik açılardan yapılabilir; örneğin biçimlerine göre yapılacak bir sınıflandırmada üç grup söz konusudur:

- Elyafli karma malzemeler (CTP)
- Parçacıklı karma malzemeler (beton)
- Tabakalı karma malzemeler (formika)

Mühendislikte kullanılan karma malzemelerin büyük çoğunluğu takviye edilerek özellikleri geliştirilmiş malzemelerdir. Takviyelerin yapılışı bakımından yapılacak sınıflandırmada ise üç ayrı grup düşünülebilir:

a) Elyaf takviyeli karma malzemeler (ETKM):

Bunlarda matris kuvvetleri elyafa iletir. Kuvvet tümüyle elyaf tarafından taşınır. Elyafın genellikle yönlendirilerek kullanıldığı bu malzemelerde özellikler anizotropiktir. Örnek: cam takviyeli plastikler.

b) Küçük parçacıklarla dayanımı artırılmış malzemeler

Kuvvetler matris tarafından taşınır. Küçük parçacıklar (0,01-0,1 um), metal malzemede dislokasyonların hareketini engelleyerek dayanımı artırırılar. Özellikler izotropiktir. Örnek: çökelme sertleşmesi uygulanmış alüminyum alaşımı.

c) iri parçacık takviyeli karma malzemeler

Yükü matris ve elyaf birlikte taşırlar. Özellikler izotropiktir. Örnek: beton, sert metal uçlar v.s.

Bu ders kapsamında makina mühendisliğinde yaygın olarak kullanılan ve en gelişmiş karma malzeme türü olarak kabul edilen elyaf takviyeli karma malzemeler üzerinde durulacak ve bunların özellikleri, üretim yöntemleri ile uygulama alanları tanıtılacaktır.

BÖLÜM 2

M A T R İ S M A L Z E M E L E R İ

Matris, elyaf takviyeli karma malzemelerin önemli iki bileşeninden biri olup, elyaf takviyelerin öngörülen zorlamaları taşıması matrisin uygun olarak seçilmesine bağlıdır. Matrisin başlıca görevleri;

- kuvvetleri elyafa iletmek
- lifleri ortamın etkisi ve darbelerden korumak
- KM' nin tokluğunu arttırmak

olarak sıralanabilir.

2.1. PLASTİK MATRİS MALZEMELERİ:

Plastikler karma malzemelerde matris olarak yaygın bir biçimde kullanılırlar. Bunların yapı ve özellikleri metaller kadar tanınmadığından burada kısaca ele alınacaktır. Plastik matris malzemelerinin başlıca üretim ve kullanım özellikleri şunlardır:

Üretim özellikleri:

- vizkozite ve sertleşme süresi
- elyafı ıslatma kabiliyeti
- üretim sırasında uygulanan sıcaklık ve basınç
- gözenek oluşma tehlikesi
- saklama süresi

Kullanım özellikleri:

- mekanik özellikleri
- yoğunluk

- kullanım sıcaklığının sınırları
- korozyon gibi ortam etkilerine karşı dayanıklılık

Elyaf takviyeli karma malzemelerde matris olarak kullanılan plastik reçineler termoset ve termoplastikler olarak sınıflandırılabilir.

Termoset plastikler küçük monomer moleküllerini uzun ve aralarında kuvvetli bağlar bulunan polimer molekülleri haline getiren kimyasal reaksiyonlar sonucunda oluşur. Bu reaksiyonların gerçekleşmesi için genellikle bir sertleştirici ve hızlandırıcı (katalizör) katılması ve bazen enerji verilmesi (ısı, mikrodalga vb.) gereklidir. Sıvı reçine önce jelleşir, daha sonra tam sertleşir. Kovalent üç boyutlu bağların oluşması nedeniyle termosetler oldukça rijittirler. Polimerizasyon reaksiyonu tersinir olmadığından tekrar ısıtılarak yumuşatılamazlar. Yüksek sıcaklıklarda ise kovalent bağlar kopar ve malzeme giderek kömürleşir. Polyester, epoksi, fenolik ve silikon gibi termoset polimerler elyaf takviyeli karma malzemelerde yaygın olarak kullanılan matris malzemeleridir.

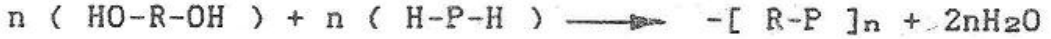
Termoplastikler ise rijit bir ağ yapısına sahip değildirler. Burada önce çizgisel molekül zincirleri oluşur, sonra bunlar birbirlerine genellikle zayıf Van der Waals bağları ile bağlanırlar. Bir termoplastik malzeme kritik bir "camsı duruma geçiş sıcaklığının" üzerine ısıtılırsa yumuşar ve sıcaklık arttıkça plastiğin viskozitesi düşer. Bu malzemeler tekrar soğutulduklarında yeniden sertleşirler. Buharlaşıma ile bileşimleri değişmediği sürece bu çevrim istenildiği kadar tekrarlanabilir. Termoplastik matrisli KM üretimi daha güçtür, çünkü termoset reçinelerin sıvı halde bulunduğu sıcaklıklarda termoplastiklerin viskozitesi hala yüksektir. Dolayısıyla matris-elyaf bağının gerçekleştirilmesi daha zordur. Bu malzemelerin kullanım sıcaklıkları da termoset malzemelerden daha düşüktür.

Plastik matrisli karma malzemeler üretim masrafları düşük olduğu için yaygın olarak kullanılırlar. Düşük yoğunlukları, düşük elektrik ve ısı iletkenlikleri ile yüksek

korozyon dayanımları bu malzemelerin başlıca üstünlükleridir. Genellikle termosetler tercih edilir; ancak şekillendirme kabiliyetlerinin çok iyi olması nedeniyle elyaf takviyeli termoplastikler de giderek yaygınlaşmaktadır.

a. Polyester

Karma malzeme matrisi olarak, özellikle cam elyaf takviye ile birlikte yaygın olarak kullanılır. Ester grubunun sertleşmesi ile oluşur. Ester polimerizasyonunda reaksiyon, dibazik ve diasitik monomerlerin birleşmesidir;

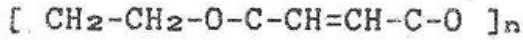


örneğin etil glikol (HO-CH₂-CH₂-OH)

ve fumarik asit HO-C-CH=CH-C-OH

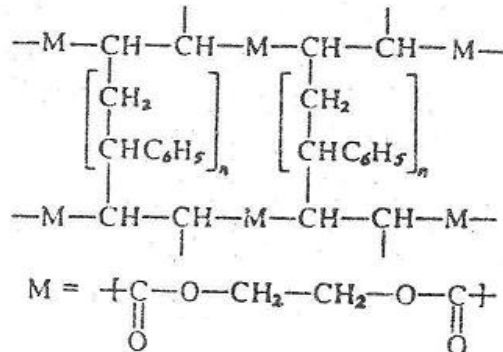


kullanıldığında



polimeri oluşur.

Burada karbon atomları arasında çift bağ bulunması polimerin doymamış olduğunu gösterir. Bu çift bağlar doymamış bir monomer yardımıyla polimer zincirleri arasındaki çapraz bağların kurulmasına ve üç boyutlu, kuvvetli bir ağı oluşturulmasına (sertleşme) olanak sağlar. Bu durumda sertleştirici olarak kullanılan monomer ağı bir parçası olur. Sertleşmenin derecesi ve hızı bir hızlandırıcı yardımıyla kontrol edilir.



Polyesterlerde bağların şekli değiştirilerek çok farklı özellikler elde edilebildiğinden, bunlar hakkında genel bir fikir vermek oldukça güçtür. Polyester reçineler 100° C sıcaklığın altında mekanik ve kimyasal dayanım bakımından iyi olup, fiatları düşüktür. Polyesterin sertleşme öncesinde viskozitesi düşüktür ve cam elyafını çok iyi ıslatır. Karma malzemelerde matris olarak kullanılırken dolgu malzemeleri katılabilir.

Polyesterin zayıf yönleri:

- Sertleşme sırasında kendini çekme oranı yüksektir (% 5..12) ve bu durum liflerin basma gerilmeleri altında burkulmasına neden olabilir. Bu nedenle malzemenin basma zorlanmaları altındaki dayanımı düşüktür ve düzgün yüzey elde etmek güçtür.

- Özellikle alkali ve bazik ortamlarda korozyon dayanımı düşüktür.

- Bünyesine su alarak bozunur.

b. Epoksi

Gelişmiş kompozitlerde genellikle tercih edilen ve her tür elyaf ile kullanılabilen bir reçinedir. Epoksit grubunun polimerizasyonu ile elde edilir. Farklı formüller kullanılarak özelliklerini büyük ölçüde değiştirmek mümkündür. Çok değişik epoksiler geliştirilmiştir ve uygun bir seçim yapmak çok önemlidir. Kullanılan sertleştiricinin türü, ortaya çıkan karma malzemenin özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Sertleşme süresi 1 saat dolayında olup 127 ve 177 °C sıcaklıklarda ve genellikle basınç altında gerçekleştirilir. Ayrıca epoksilerin 250° C'ye kadar ısıl kararlı türleri de geliştirilmiştir. Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yoktur. Dayanımları yüksektir, birçok elyaf ile iyi bir bağ oluşturur ve ayrıca kimyasal dayanımları da yüksektir.

c. Yüksek sıcaklık reçineleri:

127'den 316° C sıcaklığa kadar kullanılan polimit reçine türleri vardır, ancak bunların üretimleri güçtür. Fiatları epoksiye göre daha yüksektir.

Fenolik reçineler 300° C 'ye kadar sürekli, asbest elyafla takviye edildiği takdirde 1000° C 'ye kadar kısa süre ile kullanılabilir. Viskozitesi yüksek olan bu reçinelerde gözenek oluşması tehlikesi vardır; yüksek kalıplama basınçları uygulanır. Sertleşme sonrası 250° C sıcaklığa kadar bir ısı işlemin uygulanmasını gerektirir. Alkalilere karşı duyarlı olup, suya ve birçok aside karşı dayanıklıdır.

Silikon, mekanik özellikleri düşük olmasına rağmen 250 ° C 'ye kadar sürekli çalışabilir. Pahalı olmasına rağmen mekanik ve elektriksel özellikleri ile suya, ısıya ve oksidasyona karşı dayanımları mükemmeldir.

Karma malzeme matrisi olarak kullanılan bazı termoset reçinelerin özellikleri Çizelge 2.1. 'de verilmiştir.

Çizelge 2.1: Karma malzeme matrisi olarak kullanılan bazı reçinelerin özellikleri

Özellik	Polyester	Epoksi	Polimit
Yoğunluk gr/cm ³	1,1 - 1,4	1,1 - 1,2	1,43 - 1,9
Çekme Modülü GPa	1,2 - 4,0	2,0 - 5,0	3,1 - 4,9
Kayma Modülü GPa	1,0 - 2,0	1,5	-
Çekme Dayanımı MPa	42 - 90	55 - 120	70 - 110
Basma Dayanımı MPa	140	-	289
Poisson Oranı	0,35 - 0,36	2,5 - 3,9	-
Kopma Uzaması (%)	2 - 6	1,5 - 8,5	1,5 - 3
Isıl Genleşme Kat. cm/cm. °C ⁻¹ (x10 ⁻⁶)	60,0 - 70,0	55,0 - 70,0	-
Kullanım Sıcaklığı (°C)	100	150	300
Çekme %	5 - 12	1 - 5	-

2.2. METAL MATRİS MALZEMELERİ:

Metaller organik reçinelere göre çok daha yüksek dayanımlı matrislerdir. Buna ek olarak metal matris, karma malzemelerin tokluğunun ve kullanım sıcaklığının yükselmesini sağlar. Ancak matrisin metal olduğu karma malzemelerin üretimi güçtür ve bunlar her elyaf ile birlikte kullanılamazlar. Metal matris içinde en kolay kullanılabilen elyaf en nadir ve pahalı elyaf türü olan bor ve borsic (yüzeyi silisyum karbür kaplı bor) elyaftır. Yaygın olarak kullanılan metal matrislere örnek olarak 6061 ve 2024 alüminyum alaşımları ile 1010 saf alüminyum gösterilebilir. Burada karma malzeme 450 - 550°C sıcaklıkta sıcak presleme ile üretilebilir. Böyle bir karma malzeme 300°C 'ye kadar, oda sıcaklığındaki özelliklerini korur. Titanyum alaşımları da yayınma bağı yoluyla borsic ve SiC elyafla birleştirilerek matris olarak kullanılabilir. Bu tür bir karma malzemenin kullanım sıcaklığı 420..520°C'a çıkar. Karbon elyaf da alüminyum alaşımı içine gömülebilir, ancak karbon ile alüminyum arasındaki galvanik korozyonun önlenmesi için önce yüzeyinin nikel veya gümüşle kaplanması gerekir.

2.3. ÇOK YÜKSEK SICAKLIK MATRİSLERİ:

Seramiklerin matris olarak kullanılması halinde karma malzemeler 1300°C 'ye kadar kullanılabilme şansına sahip olur. Bu tür karma malzemelerin en gelişmişlerine örnek olarak SiC veya Al₂O₃ elyaf ile takviye edilmiş, SiC ve Si₃N₄ seramikleri gösterilebilir. Karbon elyafında kullanılabildiği bu tür matrislerde (cam, seramik, mullit, MgO, Al₂O₃, SiC) liflerin rolü farklıdır. Mekanik özellikleri bakımından matristen çok farklı olmayan elyafın buradaki görevi daha çok malzemenin tokluğunu arttırmaktır.

Karbon matris içine gömülü karbon elyafından oluşmuş kompozitlerin 4000°C'ye kadar dayanma şansı vardır. Burada matris bir organik matrisin poligonizasyonu veya buhar çökeltme ile elde edilir. Bu kompozitler yüksek sıcaklıklarda olağanüstü ısı ve mekanik özelliklere sahiptirler.

BÖLÜM 3

ELYAF TÜRLERİ

Elyaf takviyeli karma malzemelerde, elyafın birinci işlevi yükü taşıyarak dayanım ve rijitliği artırmaktır. Bir malzemenin elyaf olarak adlandırılabilmesi için ASTM'ye göre

- Uzunluk/enine ortalama boyut en az 10/1
- En büyük kesit $\leq 0,05 \text{ mm}^2$
- En büyük genişlik $\leq 0,25 \text{ mm}$ koşulları verilmektedir.

Sürekli elyaf, fitil veya filament olarak da adlandırılır. Metal lifler için ise tel adı da kullanılır. Bir elyafın kesitinde, genişlik/kalınlık oranı 4:1 ise, şerit adı verilir. Elyaf lar genellikle üç gruba ayrılır:

- Doğal elyaflar (örneğin yün, pamuk, asbest)
- Rejenere elyaf (Doğada bulunan uzun makro moleküllerden yararlanılarak elde edilirler, rayon)
- Yapay elyaf (nylon, keklar)

Aşağıda karma malzemelerde kullanılan bazı önemli elyaf türleri hakkında özet bilgi verilmektedir.

3.2. CAM ELYAFI:

Reçine matrisli karma malzemelerde cam elyafı en yaygın kullanılan ve en ucuz takviye türüdür. Esas olarak SiO_2 olan camda diğer elementlerin oksitleri de bulunur. Değişik özellikler (elektriksel, kimyasal, korozyon dayanımı ve elastiklik modülü) elde etmek için, farklı kimyasal

bileşimlerde olan camlar üretilir. Takviye olarak en yaygın kullanılan iki tür camın özellikleri diğer elyaf türleriyle karşılaştırmalı olarak Çizelge 3.1'de verilmiştir. En yaygın olarak kullanılan tür E camıdır, alüminyum ve magnezyum oksit içeriği daha yüksek olan S-camının ise mekanik özellikleri daha iyidir. Daha çok ABD'de üretilen S-camının, yaklaşık aynı özelliklerde olanı Avrupa'da R-camı olarak piyasaya sunulmaktadır. Kuvarz yüksek saflıkta silikadır (% 99,95 SiO₂). Pahalı olduğundan, mükemmel dielektrik özelliklerinin ve yüksek sıcaklık dayanımının gerektiği yerlerde kullanılır. 1800° C sıcaklığa kadar ısıl kararlı olup, örneğin uzay araçlarının ısıl zırhlarında kullanılabilir.

Cam elyafının üstünlükleri ucuzluğu, yüksek çekme ve darbe dayanımı, yüksek kimyasal dayanım olup, zayıf yönleri ise düşük elastiklik modülü, liflerin sürtünerek birbirini aşındırması, düşük yorulma dayanımı ve matrise tutunmanın az oluşudur. Cam yanmaz, mekanik özellikleri ise yüksek sıcaklıklarda çok fazla düşmez. Çok güçlü alkaliler ve hidroflorik asit dışında korozyon dayanımı mükemmeldir.

Cam elyaf sürekli ve süreksiz olarak üretilir. 1900° C sıcaklıktaki sıvı cam, bir platin kovanın tabanındaki çok sayıdaki delikten aşağıya demet halinde çekilir. Bir soğutma işleminden sonra, koruyucu (sizing) yüzey kaplaması uygulanır. Bu tabakanın görevleri:

- sürtünmeyi azaltarak hem aşınmayı önler, hem de üretim sırasında liflerin birbirine göre hareketini kolaylaştırır,
- matris ile arayüzeyi oluşturur.

Bazı durumlarda ise geçici bir sizing uygulanarak, bu tabaka KM üretimi sırasında uzaklaştırılarak matris/elyaf arayüzeyinde daha yüksek dayanım sağlayan bir bağlayıcı (coupling) tabaka uygulanır.

Lifler daha sonra fitil olarak adlandırılan demetler halinde toplanır. Bu üretim sırasında hız 3 km/dak'ya kadar ulaşabilir. Bobinlere sarılan elyaf kondisyonlanır ve kurutulur. Bu sırada sizing içindeki solvent ve su giderilir.

Çizelge 3.1: Bazı elyaf türlerinin özelliklerinin karşılaştırılması

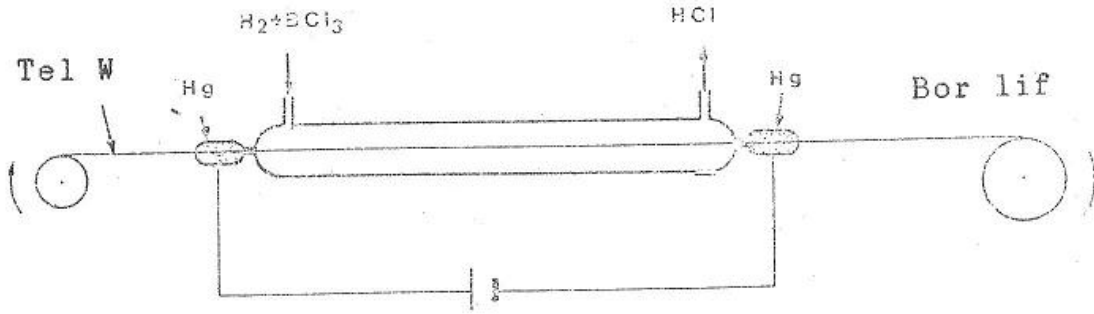
Elyaf	E-Camı	S-Camı	Kuvarz	Bor	Karbon	Kevlar 49
Elyaf yoğ.(g/cm ³)	2,54	2,49	2,2	2,68	1,85	1,44
σ_{ce} (MPa)	3448	4585	3100	3448	2900-2000	2706
E_e (GPa)	72,4	85,5	68,9	413,7	520-220	131
d_e (mm)	0,003-0,02	0,003-0,013	0,01	0,1-0,2	0,005-0,013	0,012
Isıl Genleşme Kat. °C ⁻¹ (x10 ⁻⁶)	5	2,9	2,9	3	-1	-2
Kopma Uzaması (%)	2,75	-	-	0,7	0,5-1,3	2,5
Fiyat(\$/kg)[1980]	1	16	-	500		28

Camın viskozitesi, sıcaklığı ve çekme hızı değiştirilerek farklı çaplarda (ticari olarak 2,5 μ m - 20 μ m) elyaf elde edilebilir. Piyasaya sunuluşu,

- Fitol (bükümsüz),
- Fitol (yarı bükülmüş),
- Bükülmüş iplik,
- Keçe ve
- Dokuma şeklindedir.

3.2. BOR ELYAF:

Bor, periyodik cetvelde oda sıcaklığında katı durumda olan ikinci hafif elementtir. 1960'lı yıllarda elyaf olarak üretildiklerinde geleceklere çok parlak görölüyordu. Ancak



Şekil 3.1: Bor elyafın elde edilişi

bor elyaftan birkaç yıl sonra üretilmeye başlanan karbon elyaf birçok uygulamada bunların yerini almıştır. Pahalı olmasına rağmen bor elyaf, yüksek dayanımı nedeniyle özellikle metal matrisler ile bazı uygulamalarda hala kullanılmaktadır. Bor sert ve gevrek olduğundan doğrudan lif olarak çekilemez. Bu nedenle hidrojenle ve bortriklorürün elektriksel olarak 815°C sıcaklığa ısıtılmış W teli üzerinde çökeltilmesi ile elde edilir (Şekil 3.1). W tel pahalı olup yaklaşık $10\ \mu\text{m}$ kalınlığındadır. Lifin son çapı $150\text{...}200\ \mu\text{m}$ civarındadır. Üretim parametrelerinin çok sıkı olarak kontrolü gereklidir, üretim hızı en çok $150\ \text{m/h}$ 'dir. Metal matrisle birleştirilirken sıcak presleme sırasında elyafın özelliklerinin bozulmaması için yüzeye bor karbür (B_4C) ya da silisyum karbür (SiC) kaplanır.

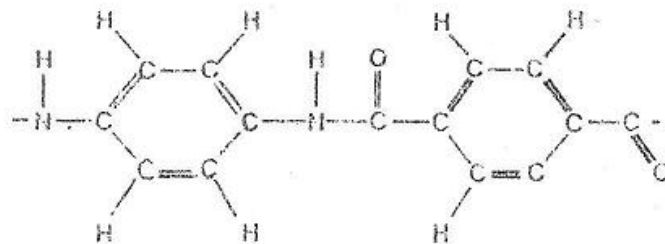
Bor lifler karma malzemelerde kullanılan en kalın elyaf türü olup (Çizelge 3.1) karbon liften 20 kat daha kalındır. Burkulmaya karşı dayanımlarının yüksek olması nedeniyle çekme yanında basma dayanımları da iyidir.

Çoğunlukla metal matrislerle kullanılır. Metallerle birleştirilmeleri diğer elyaflara göre daha kolaydır. Örneğin bor takviyeli alüminyum borular uzay araçlarında konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılırlar.

3.3. ARAMİD ELYAF:

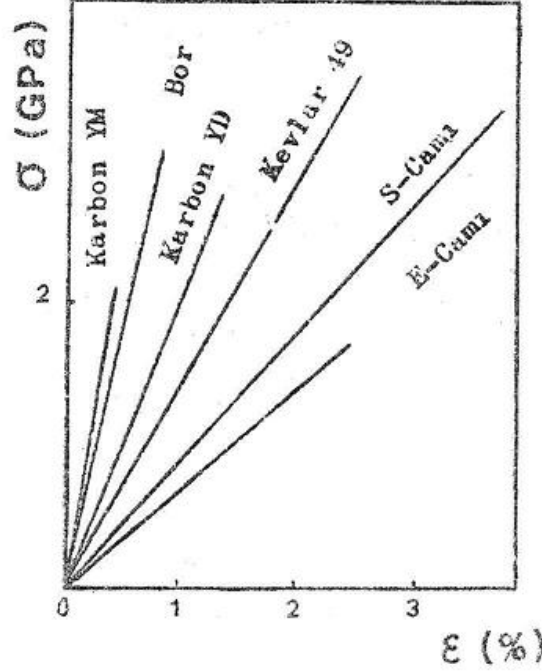
Değişik yapay elyaf türleri otomobil lastikleri, balonlar, paraşütler gibi yerlerde takviye olarak kullanılmaktadırlar. Bunlar arasında en çok tanınanlar amin gruplarının tekrarlandığı polimerler, örneğin polyamid veya naylon ile benzen halkaları içeren aromatik polyamidlerdir (aramidler). Aramid ailesi içinde Dupont firmasının geliştirerek 1970'li yıllarda piyasaya sunduğu Kevlar 29 ve Kevlar 49 en çok kullanılan türlerdir. Aramidler erimediklerinden çözeltiden elde edilirler ve çözeltinin molekül sel düzeni özelliklerini belirler. Örneğin Kevlar'da molekül "poli p-fenilentereftalamit:PPT" dir.

Kevlar 49 çok ilginç bir elyaftır ve önceleri oto lastiklerinde çelik tellerin yerini alması için üretilen bu malzemenin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Camdan hafif ve rijit olup, fiatı camdan pahalı, diğer elyaflardan daha ucuzdur. Elyafa işlem yapmak çok kolaydır ve üretimleri değişik biçimlerde gerçekleştirilebilir (iplik, fitil, dokuma). Elyaf sarmada başarı ile uygulanabilirler (basınçlı kaplar ve roket gövdeleri). Basma dayanımlarının düşük olması kullanımlarını sınırlar. Isındıkça kısalırlar ve bu durum tasarımda gözönüne alınmalıdır. Yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımları oldukça iyidir. En zayıf yönleri kolay eğilmeleridir. Kesmesi zordur. Birçok ortamda korozyon dayanıklılığı iyi olmasına rağmen sülfirik aside ve güneş ışınlarına karşı duyarlıdır. 100°C sıcaklığa kadar çekme dayanımı ve E modülü sabit kalır, 300°C'den sonra ani olarak düşer.



Şekil 3.2: Kevlar'ın molekül yapısı

3.4. KARBON ELYAF:

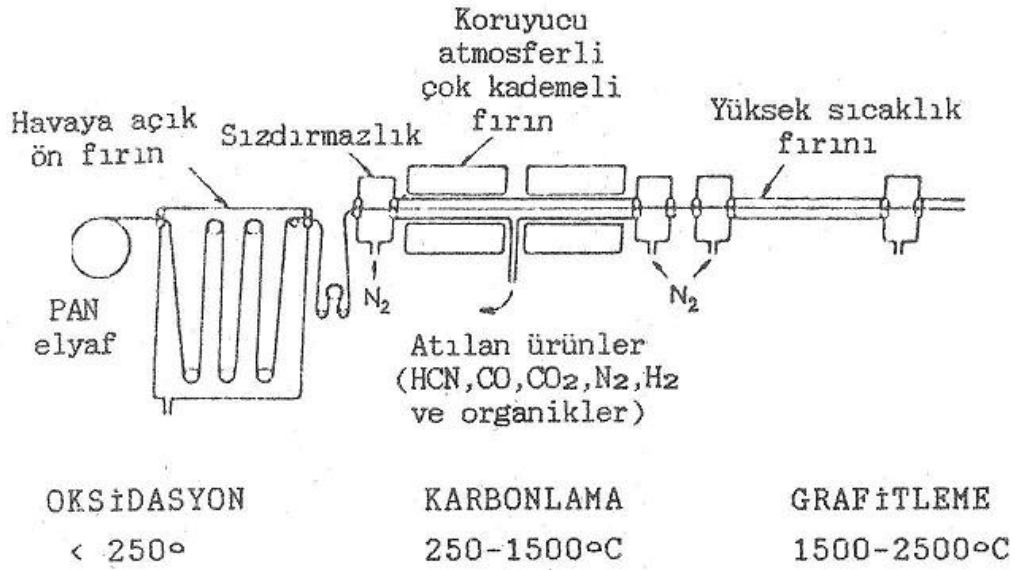


Şekil 3.3: Değişik elyaf türlerinin elastiklik modülleri

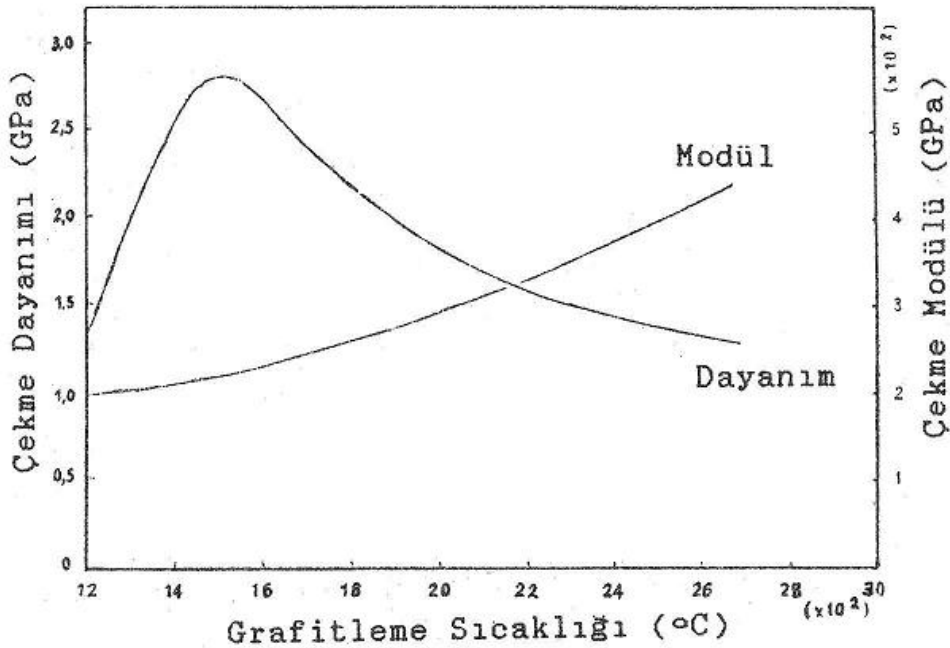
1965'ten sonra geliştirilen ve öncelikle uçak ve uzay sanayinde geniş uygulama alanı bulan karbon elyaf, karma malzeme teknolojisinde büyük öneme sahiptir. Yüksek elastiklik modülüne sahip karbon elyafın yoğunluğu düşük, yüksek sıcaklık dayanımı iyidir. Önceleri kılcal kristal (whisker) olarak elde edilebilen bu malzeme, geliştirilen teknikler sayesinde sürekli lifler olarak da üretilmektedir. Bu yöntemlerde yüksek oranda karbon içeren bir ön mamul kullanılır (örneğin rayon ve polyacrylonitrile -PAN). Isıl ve mekanik etkilerle karbon dışındaki elementler giderilmeye ve elyafta güçlü karbon-karbon bağları elyaf eksenine getirilmeye çalışılır.

Elyafın özellikleri son işlemin sıcaklığına bağlıdır. (Şekil 3.5) Düşük sıcaklıklarda elyaf amorf bir yapıya sahip, yüksek sıcaklıklarda ise grafit sdh kristal yapıya sahiptir. Bu işlem sıcaklığı değiştirilerek farklı özelliklerde elyaf üretilebilir (YD: yüksek dayanım, YM: yüksek modül). Karbon

elyafın, petrolün damıtılmasında elde edilen katrandan doğrudan üretimi mümkündür ve karbon elyaf tüketimi arttığında, şu anda uygulanmasına yeni başlanan bu tekniğin yaygınlaşmasıyla elyafın fiyatı da düşecektir. Karbon takviyeli karma malzemeler uçak ve uzay sanayiinde kullanılan klasik malzemeler arasına girmiştir. Çapları 6-10 μm olan çok



Şekil 3.4: Karbon elyaf üretim şeması



Şekil 3.5: Karbon elyafın çekme dayanımı ve elastiklik modülünün grafitleme sıcaklığı ile değişimi

ince liflerin üretiminde kullanılmaları güç olduğundan 1000-1600 lif içeren demetler üretilir. Satışa sunulan biçimler ise fitil ve dokumadır. Uygulamada daha çok matris malzemesi içine önceden gömülerek hazırlanmış yarı mamulleri kullanılır (prepreg).

3.5. YÜKSEK SICAKLIK ELYAFLARI:

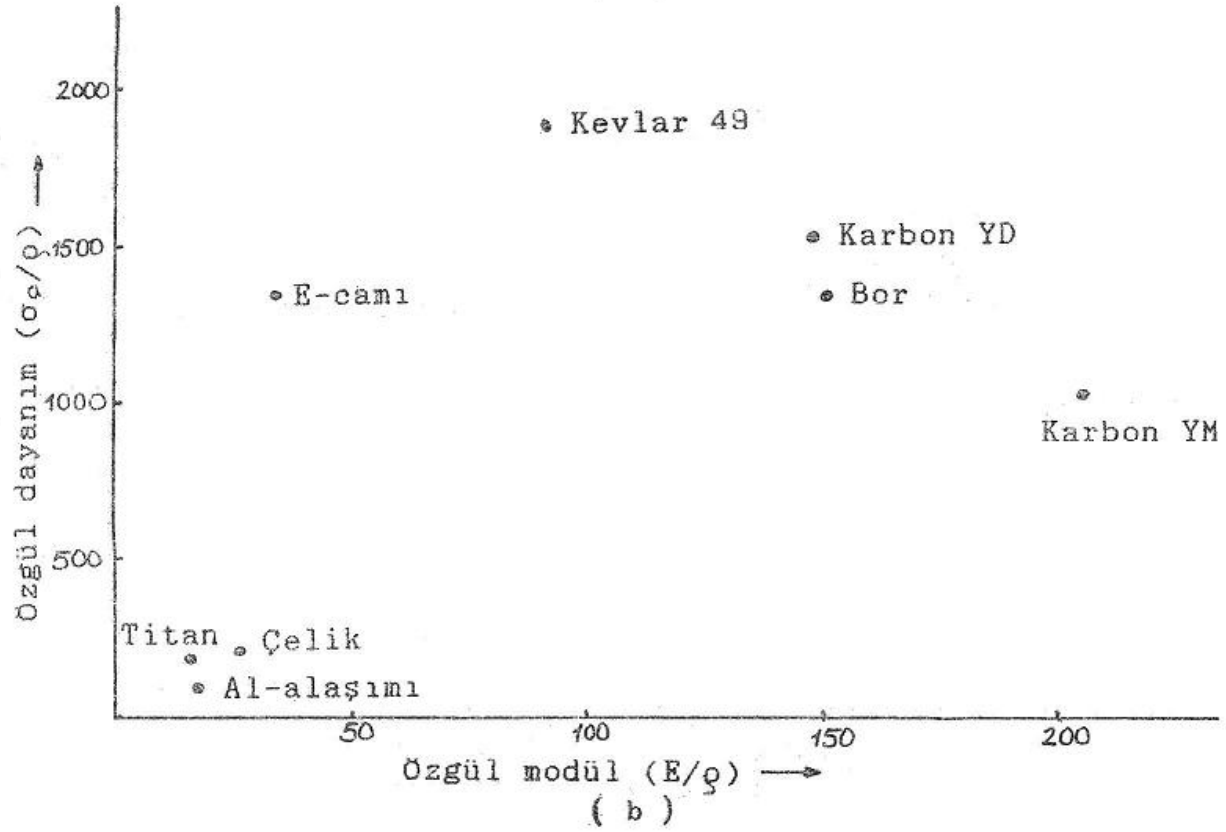
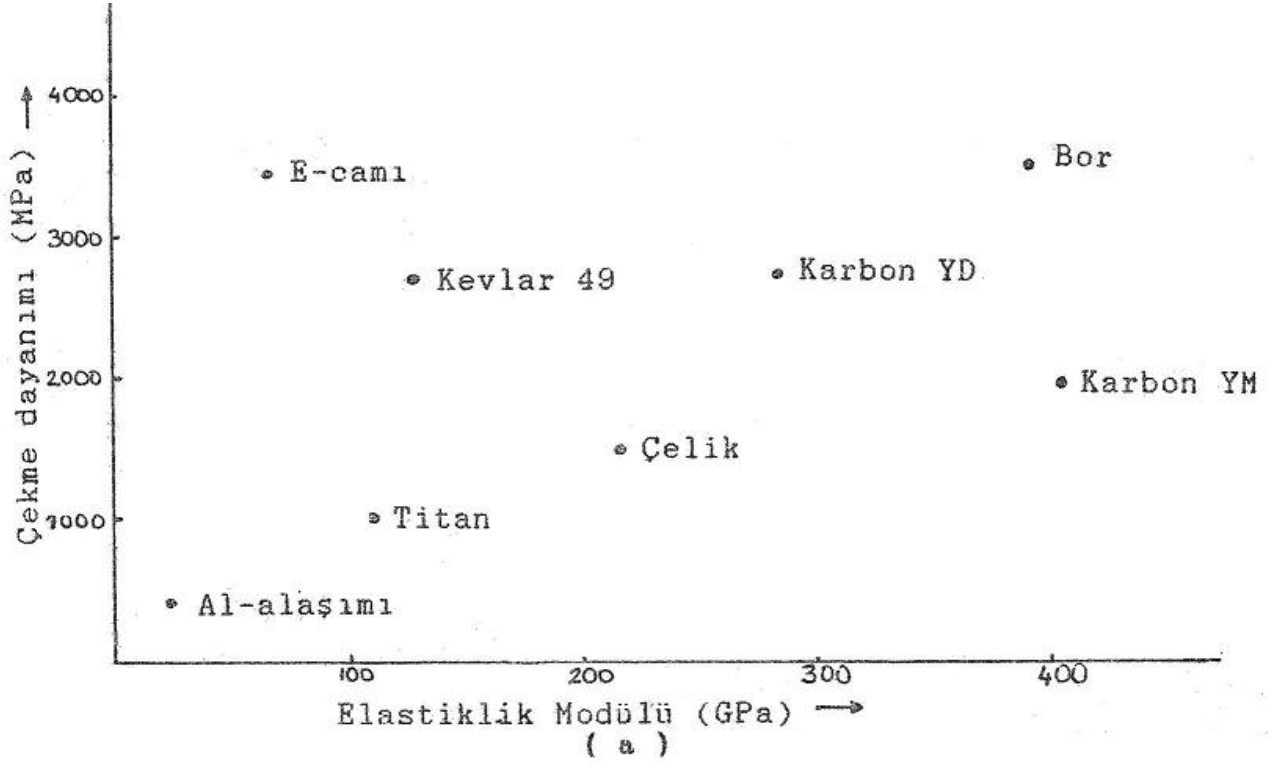
Karbon matris içinde karbon elyaftan oluşan karma malzeme oksitleyici olmayan ortamlarda 3000°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılabilir. 1000°C sıcaklık bölgesinde ise iki elyaf sözkonusudur: alüminyum oksit ve silisyum karbür.

Al_2O_3 polikristal liflerin oksidasyona karşı dayanımları iyi olup yüksek sıcaklıklarda mükemmel mekanik özelliklere sahiptirler ($\sigma_c = 1500$ Pa, $E = 380$ GPa, $\rho = 3,9$ g/cm³). Yaklaşık 20 μ m çapındaki lifler çok kırılıgandır ve genellikle metal matrislerle birlikte 700-800°C sıcaklıklara ulaşan uygulamalar için kullanılır. Nikel, demir esaslı yüksek sıcaklık alaşımları ve refrakter alaşımlar, en çok kullanılan matris malzemeleridir.

SiC elyaf, metal matrisler için dayanım ve fiyat bakımından belki de en uygun elyaftır. Bor elyafın elde edilmesine benzer bir yöntemle üretilir. 1000°C'ye kadar olan sıcaklıklarda sürekli çalışabilir. Önemli bir özelliği sıvı alüminyum içinde 30 dakika kadar etkilenmeden kalabilmesidir. Dolayısıyla SiC takviyeli alüminyumlar ucuz ve kolay olarak üretilebilirler (basınçlı döküm, kalıba döküm, sürekli döküm).

3.6. KILCAL KRİSTALLER (Whiskerler)

Whiskerler elyaf biçimindeki kılcal tek kristallerdir. İçlerinde hemen hemen hiç kristal kafes kusuru yoktur. Çok değişik malzemelerin whiskerleri üretilmiştir (metaller, oksitler, karbürler, organik bileşikler). Yüksek sıcaklık özellikleri çok iyi, elastiklik modülleri de çok yüksektir. Pahalıdırlar. Çok değişik yöntemlerle üretilebilirler (örneğin buharlaştırma-yoğuşturma).



Şekil 3.6: a) Değişik elyaf türlerinin dayanım - modül özellik çiftlerinin karşılaştırılması
b) Özgül dayanım - özgül modül özellik çiftlerinin karşılaştırılması

BÖLÜM 4

ELYAF TAKVİYELİ KARMA MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Elyaf takviyeli karma malzeme türleri çok farklı olduğundan ve ayrıca değişik biçimlerdeki parçaların üretiminde kullanıldıklarından, birbirinden farklı çok sayıda üretim yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin başlıcaları kullanılan matris türüne göre sınıflandırılarak aşağıda verilmiştir:

4.1. Reçine Matrisli Karma Malzemelerin Üretim Yöntemleri:

a) El Yatırma:

Elyaf takviyeli plastiklerde en basit üretim yöntemi özellikle CTP üretiminde kullanılan el yatırmasıdır. Bu yöntemde genellikle keçe veya dokuma biçimindeki elyaf, hazırlanan bir kalıp üzerine veya içine yerleştirilir ve matrisi oluşturan reçinenin fırça gibi basit el aletleri ile elyafı ıslatması sağlanır. İstenilen kalınlık elde edilene kadar bu işleme devam edilerek çok tabakalı bir malzeme oluşturulur. Reçine içinde kalan hava bir rulo yardımıyla çıkartılır. Sertleştiricisi önceden katılmış reçine çoğunlukla oda sıcaklığında sertleşir. Bazı durumlarda tam sertleşme için ek bir ısıl işlem gerekebilir. El yatırmasında polyster ve epoksi en yaygın olarak kullanılan reçine

türleridir. Tutuşma tehlikesini engellemek, ağırlığı arttırmak veya görünüm gibi nedenlerle reçineye değişik dolgu maddeleri katılabilir. El yatırmanın aşamaları Şekil 4.1'de görülmektedir.

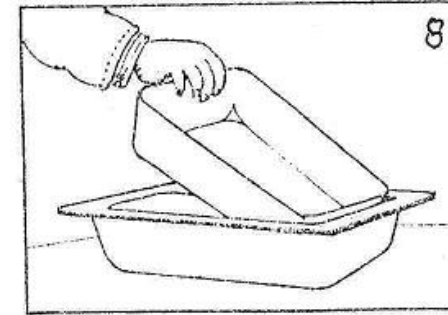
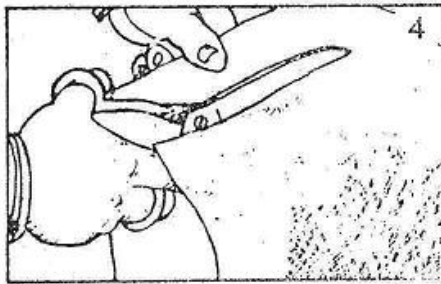
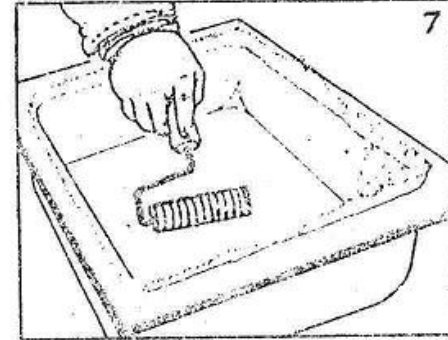
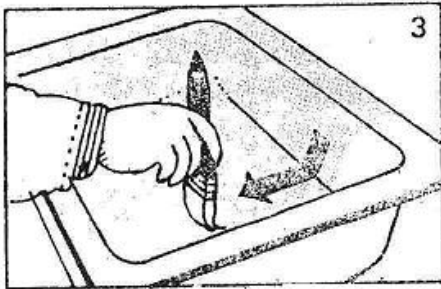
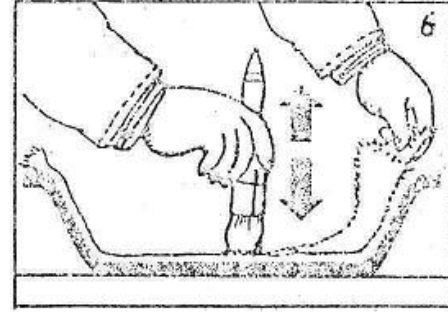
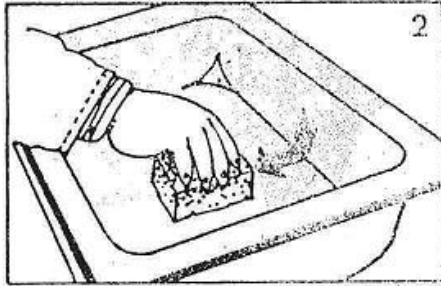
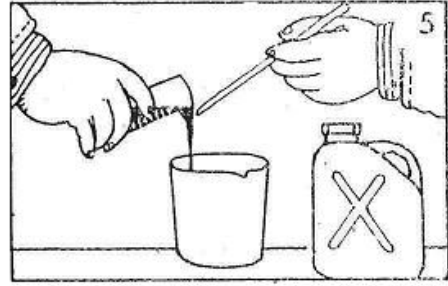
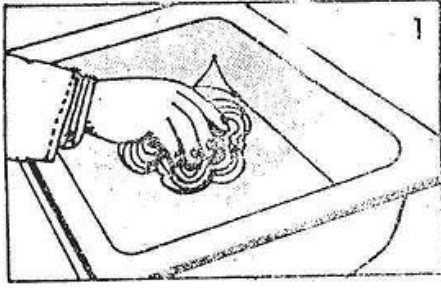
Kalıp üretiminde balmumu, kil, tahta, metal, kağıt ve plastik gibi değişik malzemeler; kalıptan ayrılmayı sağlamak için ise polivinil alkol, silikon ve madeni yağlar gibi maddeler kullanılır. El yatırma yönteminde araç ve gereç için yapılan yatırım düşüktür ve genellikle az sayıda parça üretimi (model, prototip vs.) için kullanılır. Bu yöntemle elde edilebilecek en yüksek elyaf hacim oranı (v_e) % 30'dur.

Daha yüksek elyaf hacim oranları ise, prepreg (öngömülmüş elyaf) kullanılarak elde edilebilir. Bunlar yarı sertleşmiş reçine içine düzenlenerek gömülmüş liflerdir. İstenilen geometrilerde üstüste yerleştirildikten sonra ısı ve mekanik etkilerle reçinenin tam sertleşmesi sağlanır. Bant ya da dokuma şeklindedirler. Bor elyaf, sadece tek yönlü prepreg olarak üretilir. Dokumaların yatırılması daha kolay olmasına rağmen dayanımları düşüktür. Prepreglerin geliştirilmesi ile 1970'lerden sonra otomatik yerleştirme makinaları kullanılmaya başlanmıştır. Prepregler uçak ve uzay sanayii gibi malzeme özelliklerinin belirli sınırlar içinde kalmasının çok önemli olduğu durumlarda tercih edilir, ancak maliyetleri oldukça yüksektir.

Prepreglerin başlıca avantajları şunlardır:

- a. Reçine, elyafa en uygun şekilde seçilmiştir.
- b. Parça üretilen atelyede değişik reçine ve sertleştiricilerin stoklanmasına gerek yoktur.
- c. Karmaşık biçimlerin elde edilmesi kolaydır.
- d. Otomatik makinalarla yerleştirme yapılabilir.
- e. Mamul özelliklerindeki sapmalar çok azdır.

Gelişmiş kompozitlerde yatırma işleminden sonra reçinenin sertleşmesi için değişik kalıplama yöntemleri (torba kalıplama vb.) uygulanır.



- 1) Kalıp silindikten sonra birinci kalıp ayırıcı olarak vaks sürülür,
- 2) Sünger ile ikinci ayırıcı polivinil alkol uygulanır,
- 3) Fırça ile vizkozitesi yüksek reçine (jelkot) sürülür,
- 4) Takviye olarak kullanılacak elyaf hazırlanır,
- 5) Reçine hazırlanarak katkıları karıştırılır,
- 6) Jelkot üstüne reçine sürüldükten sonra keçe yerleştirilir ve fırça darbeleri ile reçine keçeye emdirilir,
- 7) Rulolanarak hava kabarcıkları giderilir,
- 8) İşlem istenilen kalınlığa kadar devam ettirilerek, sertleşme beklenir ve ürün kalıptan çıkarılır.

Şekil 4.1: El yatırmanın aşamaları (10)

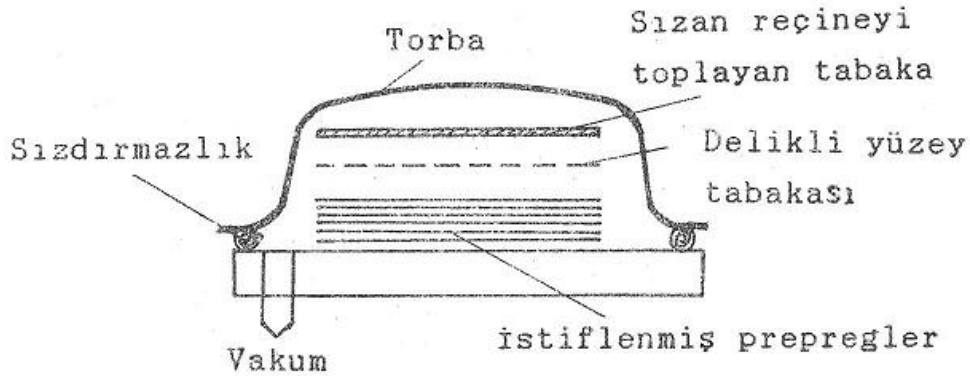
b) Torba Kalıplama:

Torba kalıplama yöntemi, kalıp üzerine istiflenerek hazırlanan karma malzemelerin sertleştirilmesinde kullanılır. Yüksek kalitede karma malzemeler elde etmek ve yapıda kalan havayı çıkarmak için uygulanan bir yöntemdir.

Vakum torbası yönteminde yerleştirilen prepregler veya reçine ile takviye malzemeleri, delikli bir yüzey tabakası ve bir kat sızan reçineyi toplayan tabaka ile kapatılır. Bu durumda fazla reçine ve hava dışarı atılabilir. En üstte esnek bir film (torba: selefon veya naylon) konularak kenarlarında sızdırmazlık sağlanır. Daha sonra vakum uygulanır. Bu işlem yerleştirmeden hemen sonra ve reçinenin sertleşmesine izin verilmeden yapılmalıdır.

Bu torbalama sisteminin tümü otoklav içine konularak sertleştirme basınçlı bir gaz (örneğin azot) altında ve yüksek sıcaklıkta da yapılabilir. Sıcak gazın sirkülasyonu üniform bir sıcaklık sağlar.

Basınçlı torba yöntemi bu yöntemlerin en ekonomidir. Vakum uygulamadan, sadece basınçlı gaz yardımıyla torba kalıba bastırılır.



Şekil 5.2: Torba kalıplama

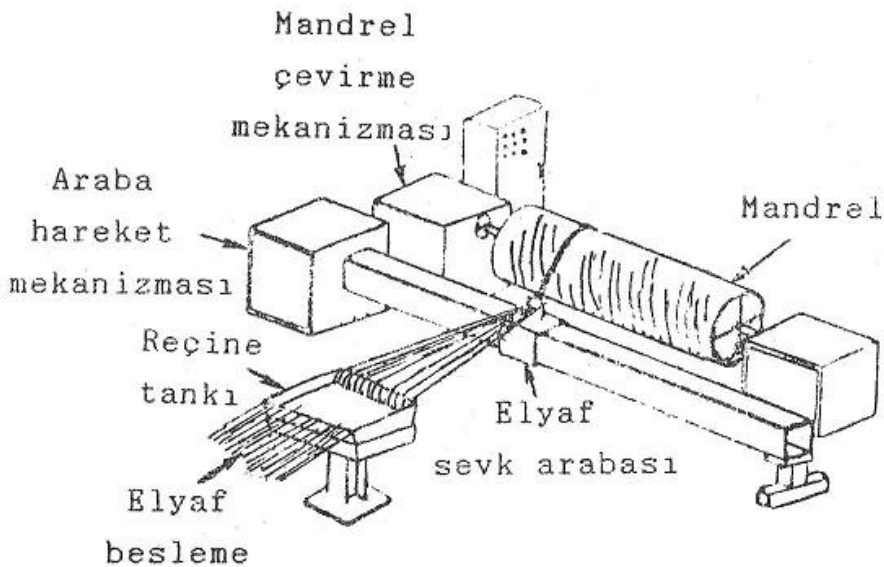
c) Püskürtme:

Bu yöntem keçe kullanarak yapılan el yatırmanın mekanize olmuş şekli olarak düşünülebilir. Yöntemde, örneğin bir tabancaya sürekli olarak beslenen elyaf kırılarak reçine ve sertleştirici ile karıştırılıp kalıba püskürtülür. Reçine

içinde kalan havayı çıkarmak ve yüzeyi düzgünleştirmek için rulolama uygulanır.

d) Elyaf Sarma:

Elyaf sarma yönteminde sürekli elyaf kalıbı oluşturan bir mandrel üzerine belirli açılarda sarılır. Bu yöntem roket gövdeleri, depo, boru ve basınçlı kap gibi silindirik parçaların üretimi için uygundur. Bu sayede elyafın takviye yönünün zorlanmanın en yüksek olduğu doğrultular ile çakışması sağlanır. En çok kullanılan reçineler polyester ve epoksi, elyaf ise camdır. Diğer yöntemlere göre elyaf hacim oranı daha yüksektir. Sarma ıslak veya kuru yapılabilir. Islak yöntemde elyaf sarılmadan hemen önce reçineye daldırılır, kuru yöntemde ise prepreg sarılır. Sarma sırasında elyafa bir gergi kuvveti uygulanır. Sarma bakımından da iki ayrı yöntem söz konusudur: Planet sarmada elyafın beslendiği kafa mandrel etrafında döner, mandrel ise hareketsizdir. Lifler yanyana dizilir. Daha yaygın olarak kullanılan helisel sarmada ise mandrel döner, elyafın beslendiği araba ise ileri geri hareket ederek lif helisel bir eğri boyunca sarılır. Helisel sarmada lifler birbiri üzerinden geçer. İki ucu kapalı

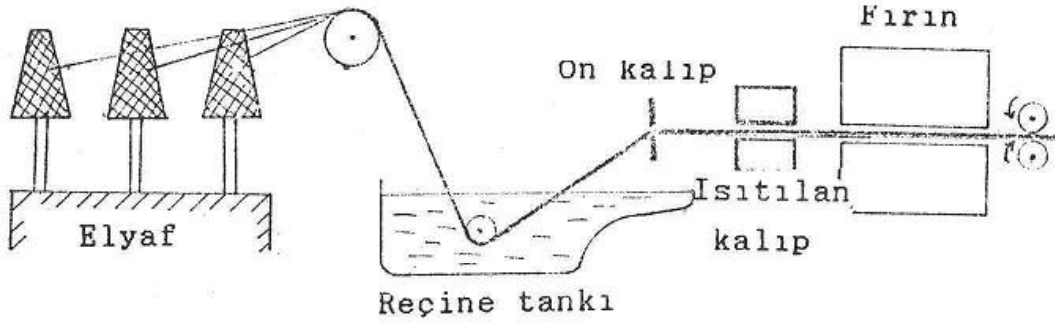


Şekil 4.3: Islak helisel elyaf sarma

parçalarda ise kalıplar daha sonra içeriden çıkarılabilecek malzemelerden (örneğin sonradan çözündürülen sert tuz) yapılır.

e) Savurma (Santrifüj) Kalıplama:

Silindirik parçaların üretimi için (örneğin boru) uygun bir yöntemdir. Kırpılmış elyaf ve sertleştirici katılmış reçine, silindirik bir kabın içine doldurulur ve döndürülen kabın cidarlarına merkezkaç kuvvetler yardımıyla dağılan karma malzeme sıcak hava ile sertleştirilir.



Şekil 4.4: Profil çekme

f) Profil Çekme:

Bu yöntem elyaf takviyeli karma malzeme elde etmek için kullanılan sürekli üretim tekniklerinden biridir. Termoset reçineye daldırılan elyaf bir ön kalıptan geçirilerek içindeki hava ve fazla reçine alınır, bu şekilde ön biçim verilmiş karma malzeme son kalıptan geçirilir. Malzeme ısıtılmış kalıbın içinde ve bunu izleyen fırında sertleştirilir. Bu yöntemle % 60-80'e varan elyaf oranlarına ulaşmak mümkündür. Benzer yöntemle levha da üretilebilir.

g) Kapalı Kalıp Kullanılan Yöntemler (Soğuk-Sıcak):

Kapalı kalıp yönteminde, karma malzeme iki kalıp arasına sıkıştırılmış durumda sertleştirilir. Genellikle boyut hassasiyeti yüksek ve karmaşık biçimli parçalarda kullanılan bir

seri üretim yöntemidir. Takviye olarak keçe, dokuma ya da ön biçim verilmiş kırpılmış elyaf kümeleri kullanılır. Elyaf yerleştirildikten sonra kalıp içine basılan reçine ile ıslatılarak ısı ve kalıp basıncı etkisiyle sertleşme sağlanır. Kalıplamada ön karışımlar da kullanılabilir. Kırpılmış elyaf, reçine, sertleştirici ve dolgu maddelerinden oluşan karışımların kullanıldığı bu yöntem ucuz ve basittir. Cidar kalınlıkları çok değişen ve keskin kenarlı parçalarda kullanılması uygundur.

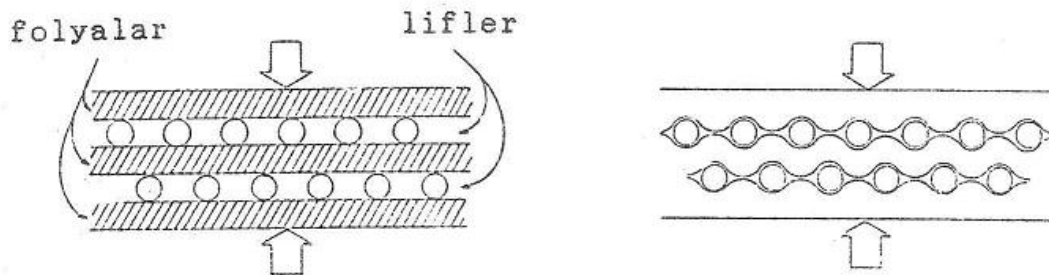
Enjeksiyon kalıplama yönteminde de hazır bileşim kalıp boşluğuna enjekte edilir. Matris olarak genellikle naylon, polietilen, polivinil ve benzeri termoplastikler kullanılır ve ev aletleri ile elektronik cihazları parçalarının üretiminde yaygın olarak uygulanır.

Seri üretime uygun bir diğer teknik de sertleşmesi tamamlanmamış ETKM levhaların (SMC: sheet moulding compound) kalıplar içinde biçimlendirilmesidir.

4.2 Metal Matrisli Karma Malzemelerin Üretim Yöntemleri:

a) Sıcak Presleme

Bu yöntemde lifler alüminyum, magnezyum ve titanyum gibi metal folyalar arasına yerleştirilerek yüzeye püskürtülen ve presleme sırasında yanacak olan bir bağlayıcı ile konumlarından kaymamaları sağlanır. Bu şekilde hazırlanan karma malzeme istenilen boyutlara kesilerek sıcak preslenir.



Şekil 4.5: Sıcak presleme

b) Toz Metalurjisi Tekniği:

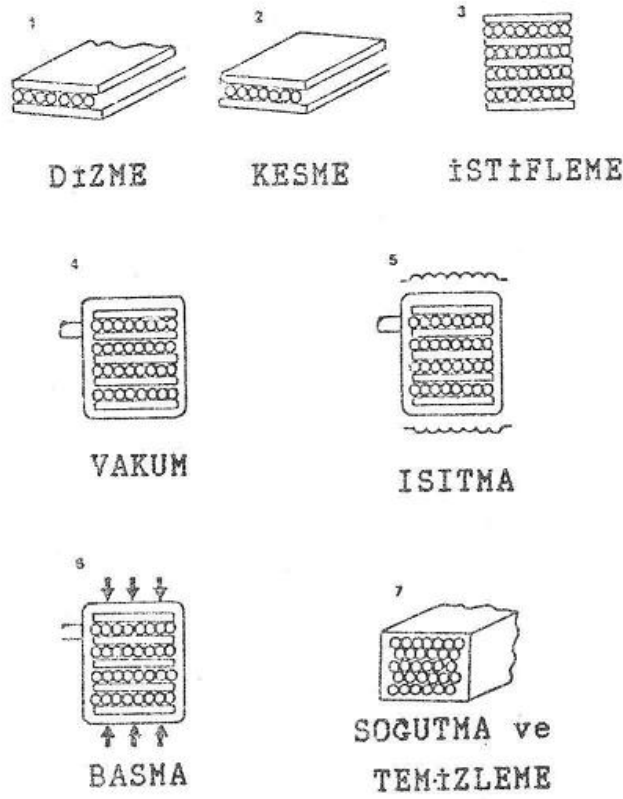
Toz metalurjisi tekniği yardımıyla toz biçimindeki metal ya da seramik malzemeler birleştirilebilir. Bunlar üniform bir şekilde karıştırıldıktan sonra katı hal difüzyonu için yeterli bir sıcaklıkta ve basınç altında sinterlenir. Bakır, nikel, alüminyum, kobalt ve çelik gibi metal malzemeler bu tekniklerle karma malzemelerde matris olarak kullanılabilirler. Kırpılmış elyaf veya kılcal kristallerle karıştırılan tozlar presleme, sinterleme, sıcak ekstrüzyon ya da haddelme ile karma malzeme olarak istenilen biçimde elde edilebilirler. Yüksek sıcaklıkta kalma sürelerinin uzun olması bazı kompozitlerin özelliklerini olumsuz etkileyebilir.

c) Sıvı Metal Emdirilmesi:

Bu yöntemde erime sıcaklıkları düşük olan alüminyum, magnezyum, gümüş ve bakır, matris malzemesi olarak kullanılır. Bir kalıpta düzenlenerek hazırlanan elyaf, sıvı metal ile ıslatılır. Çubuk ve profil gibi uzun ürünler aynı yöntemle bir elyaf demetinin sıvı metal banyosunun içinden geçirilmesiyle sürekli olarak üretilebilirler. Bu şekilde katılaşan malzemenin yapısı, tek yönde üniform olarak takviye edilmiştir ve ek işlemler gerektirmez. Ancak bu yöntemin uygulanabileceği elyaf-matris çiftleri sınırlıdır.

d) Vakumda Presleyerek Birleştirme

Sinterlemede olduğu gibi bu yöntemde de birleştirme yüksek sıcaklıkta ve basınç altında yapılır. Paslanmaz çelik, bor ve silisyum karbür gibi elyaf, alüminyum ve titanyum gibi matrislerle birlikte kullanılır. Gerekli yüzey işlemlerinden sonra, lifler istenilen aralıklarda ve yönlerde metal saçların üzerinde düzenlenir. Tabakalar halinde hazırlanan bu malzemeler bir metal kaba yerleştirilir, sızdırmazlık sağlanır ve vakuma alınır. Sonra tümü ısıtılarak yayınma ile birleştirmenin sağlanması için preslenir.



Şekil 4.6: Vakumda presleme ile B-Al ETKM üretimi

Bir diğer teknik de bant şeklinde plazma püskürtme, sıcak haddeleme ve buhar yoğunlaştırma ile elde edilmiş ön biçimlerin ısı ve basınç altında yayınma ile birleştirilmesidir.

e) Elektrolitik Yöntem:

Elektroliz banyosuna, katot olarak görev yapan bir mandrel daldırılır. Mandrele sarılmış elyafın arasına çökelen matris metali karma malzemeyi oluşturur. Bor, silisyum karbür ve volfram gibi elyaf türleri bu yöntemle örneğin nikel bir matrise gömülebilir. İşlem düşük sıcaklıkta yapıldığından elyafın özellikleri bozulmaz.

f) Buhar Çökeltme (Depoze):

Buhar fazına alınan matris takviye malzeme üzerine çökeltilir. Alçak sıcaklıkta yapılması önemli bir avantajdır. Yüksek elyaf yoğunluğu elde edilebilir, ancak pahalı olması önemli bir dezavantajdır. Alüminyum ve nikel gibi matrisler

bu yöntem için uygundur

g Haddeleme

Metal bantlar ve elyaf birlikte sürekli bant olarak haddelenir. Temas süresi kısa olmasına rağmen sıcaklık ve basınç etkisiyle yayınma bağı sağlanır. Daha sonra bu şekilde elde edilen tabakalar üstüste konularak malzemenin kalınlığı arttırılabilir.

Birlikte Ekstrüzyon

Karma malzemedeki tellerin üretiminde örneğin çelik çekirdekli alüminyum tel kullanılır. İki bileşen de aynı anda matrisler geçirilerek üretim gerçekleşir.

Plazma Püskürtme

Plazma halindeki matris takviye malzeme üzerine püskürtülür. Örneğin alüminyum silisyum karbür kaplı bor elyaf üzerine başarıyla püskürtülebilir.

In-situ Karma Malzemeler

Metallerin alaşımlarının kontrolü katılaştırılması ile de belirli bir geometrik düzene sahip iç yapıların oluşması sağlanabilir. Özellikle ötektik alaşımlar yönlendirilmiş katılaşma ile fazın bir matris daha sert ve gevrek olan diğeri ise levha veya çubuk biçimindeki takviye olmak üzere katılaştırılabilirler. Bu tür karma malzemeler in-situ kompozitler olarak adlandırılırlar.

In-situ kompozitler özellikle türbin kanatçıkları gibi yüksek sıcaklıklarda çalışan parçalarda kullanılırlar. Yüksek sıcaklık malzemeleri olarak önceleri Fe-Ni veya Co esaslı Cr-Mo ve W gibi alaşım elementleri içeren süperalaşımlar kullanılmaktaydı. Ancak bu malzemelerde zamanla ikinci bir faz çöküp özellikleri değiştirdiğinden parçaların kullanım sıcaklık ve süreleri sınırlı olmaktaydı. Öte yandan yüksek sıcaklıklardaki tane içi dayanımı tane sınırı dayanımından yüksek olduğundan süper alaşımlarda hasar gerilmeye dik olan

tane sınırlarından ayrılmalar ile başlar. Ötektikleri yönlendirerek yapılan yeniden katılaştırmada ise fazlar etkileyen gerilmeye paralel olarak katılaştırıldığından, gerilmeye dik faz sınırları bulunmaz. Bu tür malzemeler elyaf ve matris ayrı ayrı üretilip sonradan birleştirilerek de elde edilebilir. Ancak in-situ kompozitlerin üstünlüğü tek bir işlemle elde edilmeleri ve iç yapılarının çok daha kararlı olmasıdır.

Özet olarak, in-situ kompozitler yönlendirilmiş katılaşma ile mekanik ve fiziksel özellikleri (dayanım, sürünme, tokluk, iç yapı kararlılığı) mükemmelleştirilmiş ve yüksek sıcaklıklarda ikinci bir fazın çökmesinin söz konusu olmadığı metal matrisli karma malzemelerdir.

BÖLÜM 5

ELYAF TAKVİYELİ KARMA MALZEMELERİN MEKANİĞİ

Gelişmiş elyaf takviyeli karma malzemeler her biri farklı doğrultularda takviye edilmiş çok sayıda tabakadan oluşur. Böyle bir malzemenin özellikleri, örneğin metallere gibi homojen ve izotrop malzemelerden çok farklıdır.

Karma malzemelerin mekanik davranışları genellikle iki alt gruba ayrılarak ele alınır:

a) Mikromekanik'te karma malzemeyi oluşturan bileşenlerin (elyaf ve matrisin) ve bunların geometrik düzeninin, malzemenin genel özelliklerini nasıl etkilediği araştırılır.

b) Makromekanik'te ise elyaf takviyeli karma malzeme homojen, fakat anizotrop bir cisim gibi düşünülerek mekanik davranışları incelenir.

5.1. MİKROMEKANİK

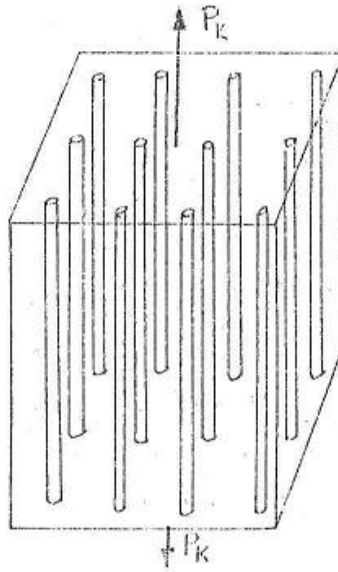
Mikromekanikte amaç, cisme etki eden dış kuvvetlerin etkisiyle heterojen karma malzeme içinde oluşan gerilme veya şekil değiştirme alanını tarif etmektir. Bu şekilde heterojen yapıdaki bileşenlerin özelliklerinin karma malzemenin genel özelliklerini nasıl etkilediği araştırılır.

Karma malzemenin genel özelliklerine etki eden faktörlerin başlıcaları:

- a) Bileşenlerin hacim oranları, biçim ve büyüklükleri ile düzenlenişi,
- b) Bileşenlerin özellikleri,
- c) Bileşenler arasındaki bağların özellikleridir.

5.1.1. Sürekli Elyafı Takviyeli Karma Malzemeler

Takviye Doğrultusundaki Elastiklik Modülünün (E_1) Hesaplanması



Şekil-5.1: Sürekli ve elyafı tek doğrultuda düzenlenmiş karma malzeme

Sürekli ve elyafı tek yönde düzenlenmiş bir karma malzeme alalım, Şekil 5.1. Bu malzemeye yük uygulandığında elyaf, matris ve karma malzeme aynı miktarda uzayacağından (Eş birim uzama);

$$\epsilon_k = \epsilon_e = \epsilon_m$$

yazılabilir. (k: karma malzeme , e: elyaf , m: matris).

Karma malzemenin taşıdığı yük ise

$$P_k = P_e + P_m$$

olur. Buradan

$$\sigma_k \cdot A_k = \sigma_e \cdot A_e + \sigma_m \cdot A_m$$

yazılabilir. Burada A kesit alanıdır. Elyaf sürekli olduğundan

$$v_e = \frac{A_e}{A_k} \quad , \quad v_m = \frac{A_m}{A_k}$$

$$v_e + v_m = 1$$

yazılabilir. Dolayısıyla

$$\sigma_k = \sigma_e \cdot v_e + \sigma_m \cdot (1 - v_e)$$

olur ve denklem birim uzama değerine bölünürse karma malzemenin elastiklik modülü için;

$$E_1 = E_e \cdot v_e + E_m \cdot (1 - v_e)$$

bulunur. Bu denklem KARISIMLAR KURALINDA PARALEL TOPLAMA olarak adlandırılır ve genel ifadesi

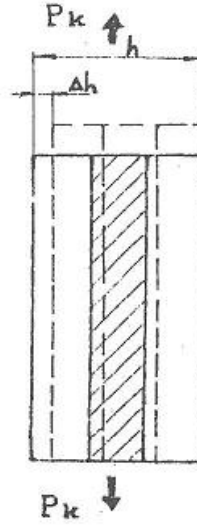
$$\sigma_k = \sum_i v_i \cdot \sigma_i$$

şeklinde yazılabilir. Burada v_i : i bileşeninin hacim oranı, σ_i : i bileşeninin özelliğidir.

12 Poisson Oranının Hesaplanması

$$\nu_{12} = - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

$$\epsilon_2 = - \frac{\Delta h}{h}$$



Şekil 5-2. Elyafların tümünün kalınlık boyunca tek bir elyaf gibi düşünüldüğü model

$$\Delta h = - h \cdot \epsilon_2 = h \cdot \epsilon_1 \cdot \nu_{12}$$

Öte yandan Δh elyaf ve matristeki daralmaların toplamıdır:

$$\Delta h = \Delta h_e + \Delta h_m$$

Eş birim uzama söz konusu ise, yani ϵ_1 her iki bileşen için de aynı ise

$$\Delta h_m = - h_m \cdot \epsilon_{2m}$$

$$\Delta h_m = h \cdot v_m \cdot \epsilon_1 \cdot \nu_m$$

$$\Delta h_e = h \cdot v_e \cdot \epsilon_1 \cdot \nu_e$$

Dolayısıyla

$$h \cdot \epsilon_1 \cdot \nu_{12} = h \cdot v_m \cdot \epsilon_1 \cdot \nu_m + h \cdot v_e \cdot \epsilon_1 \cdot \nu_e$$

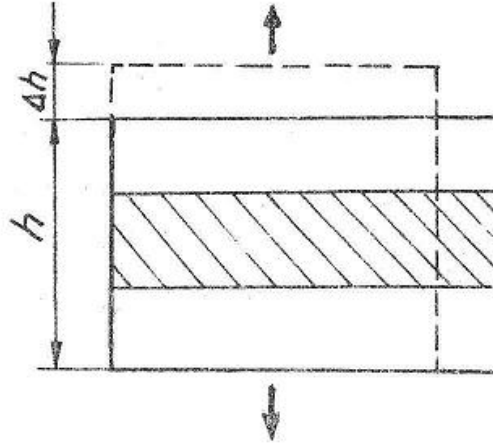
$$\nu_{12} = v_e \cdot \nu_e + v_m \cdot \nu_m$$

yazılabilir. Görüldüğü gibi ν_{12} Poisson sayısı da paralel toplama ile elde edilmektedir.

Takviyeye Dik Doğrultudaki Elastiklik Modülünün (E_2) Hesaplanması

Elyafa dik yöndeki zorlamalarda ise yapı bileşenlerinin aynı gerilme altında kaldığı kabul edilebilir (Eş gerilme);

$$\sigma_k = \sigma_e = \sigma_m$$



Şekil 5.3: Tek bir elyaf ile takviyeli ve elyafa dik yönde çekme yüküne maruz karma malzeme modeli

Malzemenin bu yöndeki uzaması

$$\Delta h = \Delta h_m + \Delta h_e$$

şeklinde yazılabilir. Öte yandan

$$\Delta h = \epsilon_k \cdot h$$

$$\Delta h_m = \epsilon_m \cdot h_m$$

$$\Delta h_e = \epsilon_e \cdot h_e$$

olduğundan

$$\epsilon_k \cdot h = \epsilon_m \cdot h \cdot v_m + \epsilon_e \cdot h \cdot v_e$$

$$\epsilon_k = \epsilon_m \cdot v_m + \epsilon_e \cdot v_e$$

$$\frac{\sigma_k}{E_k} = \frac{\sigma_m}{E_m} \cdot v_m + \frac{\sigma_e}{E_e} \cdot v_e$$

gerilmeler eşit olduğundan

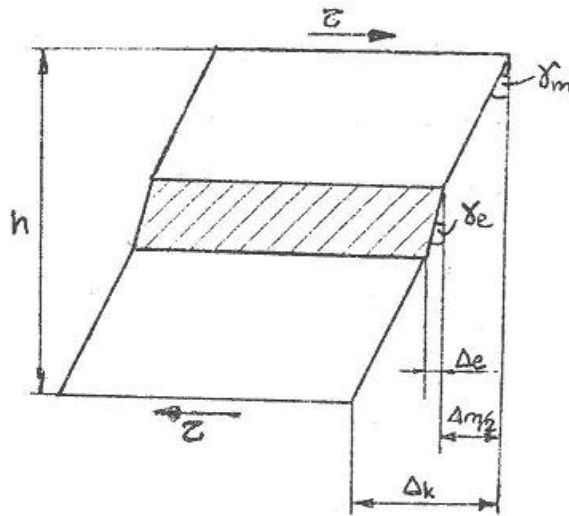
$$\frac{1}{E_k} = \frac{v_m}{E_m} + \frac{v_e}{E_e}$$

bulunur. Yani elyafa dik doğrultudaki elastiklik modülü "KARISIMLAR KURALINDA SERİ TOPLAMA" ile bulunmaktadır. Bu bağıntının genel ifadesi,

$$\frac{1}{\sigma_k} = \sum_i \frac{v_i}{\sigma_i}$$

şeklinde yazılabilir.

G₁₂ Kayma Modülününün Hesaplanması



Şekil 5.4. Tek bir elyafı takviyeli ve kayma gerilmesine maruz karma malzeme

Elyaf takviyeli karma malzemeye bir kayma gerilmesinin etkimesi halinde, elyaf ve matrisin aynı τ gerilmesi altında olduğu kabul edilebilir. Ayrıca kalınlık değişimi de ihmal edilebilir ($h \approx \text{sabit}$). Şekil değişimleri

$$\Delta_k = \Delta_m + \Delta_e$$

şeklinde yazılabilir, burada

$$\Delta_k = h \cdot \gamma_{12}$$

$$\Delta_m = h \cdot v_m \cdot \gamma_m$$

$$\Delta_e = h \cdot v_e \cdot \gamma_e$$

ve

$$\gamma_{12} = \frac{\tau}{G_{12}}$$

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m}$$

$$\gamma_e = \frac{\tau}{G_e}$$

olduğundan

$$h \cdot \gamma_{12} = h \cdot v_m \cdot \gamma_m + h \cdot v_e \cdot \gamma_e$$

yazılabilir.

$$\gamma_{12} = v_m \cdot \gamma_m + v_e \cdot \gamma_e$$

$$\frac{\tau}{G_{12}} = \frac{\tau}{G_m} \cdot v_m + \frac{\tau}{G_e} \cdot v_e$$

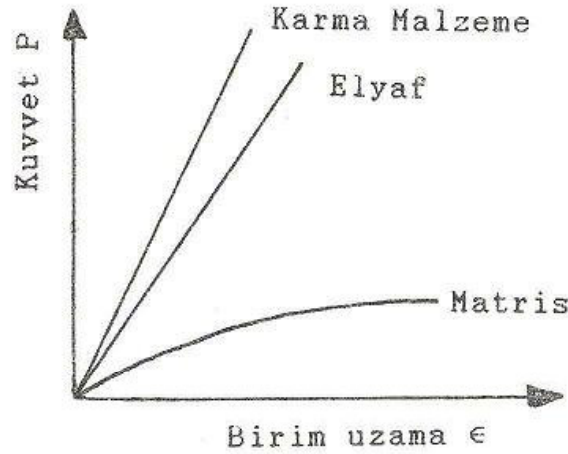
Gerilmeler eşit olduğundan

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{v_m}{G_m} + \frac{v_e}{G_e}$$

bulunur. Görüldüğü gibi burada da seri toplama kullanılabilir.

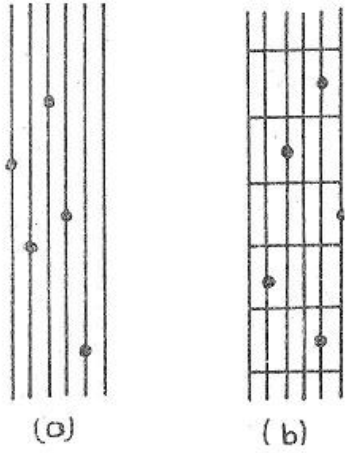
Matrisin Rolü

Matris malzemesinin elastik özellikler üzerindeki rolünü görmek için örneğin karbon-epoksi karma malzemeyi inceleyelim. Burada elyaf ve matrisin elastiklik modülleri yaklaşık olarak $E_{\text{epoksi}} \cong 4 \cdot 10^3$ MPa ve $E_{\text{karbon}} \cong 3 \cdot 10^5$ MPa'dır ve Şekil 5.5'ten görüldüğü üzere, karma malzemenin elastiklik modülünü belirlemede matrisin özelliklerinin önemi ihmal edilebilir düzeydedir.

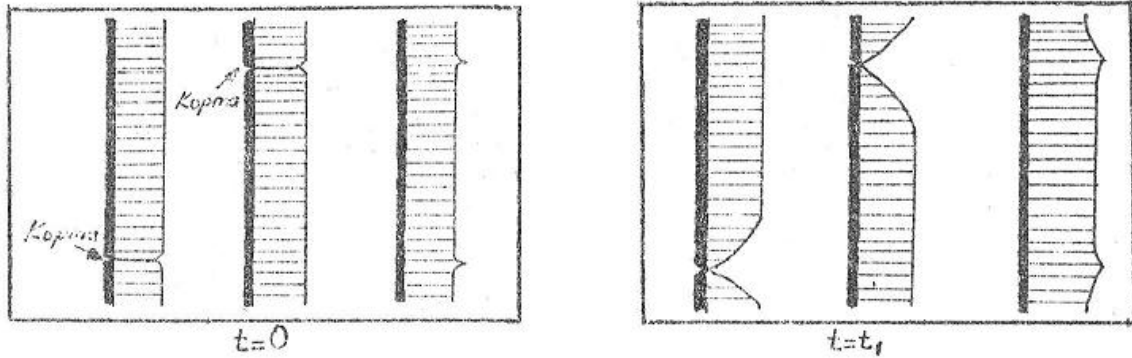


Şekil 5.5: Elyaf, matris ve karma malzemenin elastiklik modülleri

Daha önce de bahsedildiği gibi matrisin ana görevi kuvvetlerin elyafa iletmektir, ancak bunun yanında başka işlevleri de vardır. Matris, elyafı dış etkilerden korur ve ayrıca karma malzeme içinde oluşacak lif kopmalarının etkisinin sadece yerel olarak kalmasını sağlar. Bu durumu açıklamak için matris içine gömülü olmayan bir elyaf demeti alalım. Her bir lifin dayanımı ve boyu az da olsa farklı olacağından tüm liflerin aynı düzeyde zorlanması söz konusu olmayacaktır. Matrisin bulunmaması halinde liflerden herhangi birinin kopması ile hem bu lif devre dışı kalacak, hem de diğerlerinin kopma olasılığı artacaktır, Şekil 5.6a. Elyaf demeti değişik noktalardan kuvvet iletimini mümkün kılacak şekilde bağlanır ise (Şekil 5.6b), kopmanın etkisi belirli bir bölgede kalır ve kopan lifin diğer bölgeleri kuvvet



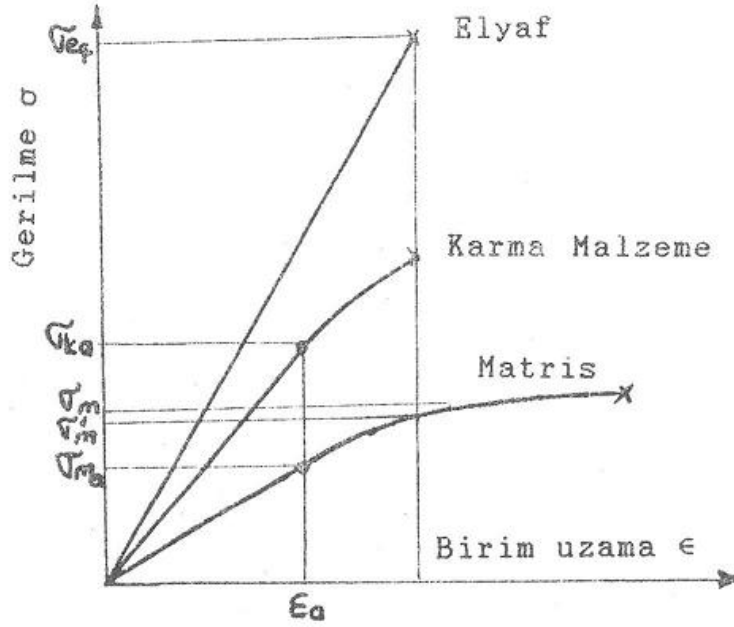
Şekil 5.6:
Elyaf demetinde kopmalar



Şekil 5.7: Matris içinde yanyana gömülü üç lifteki kopmaların etkisiyle kayma gerilmelerinin zamanla değişimi

taşımasına katkıda bulunmaya devam ederler. Liflerin bir matris içine gömülü olmasının etkisi de benzer şekildedir. Şekil 5.7’te kuvvetlerin kayma gerilmeleriyle elyafa iletildiği bir karma malzemede lif kopmalarının etkisi görülmektedir. Bazı liflerde oluşan kırılmalar, diğer liflerde gerilme artışına neden olmakta ve plastik esaslı matrisin vizkoelastik davranışı ile kopmanın etkin olduğu bölge zamanla genişlemektedir. Bu şekilde iki ayrı bölgedeki kırılmaların etkilerinin birleşmesi halinde komşu bölgelerdeki liflerin kırılma olasılığı artabilir.

Tek doğrultuda sürekli elyafla takviyeli karma malzemelerde akma ve çekme dayanımı



Şekil 5.8: Sürekli elyafila takviyeli karma malzemenin akma ve çekme dayanımı

Akma Dayanımı

Bu tür malzemelerin akma dayanımı matrisin akmaya başladığı noktada hesaplanır:

$$\epsilon_a = \sigma_{ma}/E_m$$

$$\sigma_{ka} = E_k \cdot \epsilon_a = (v_e \cdot E_e + v_m \cdot E_m) \cdot (\sigma_{ma}/E_m)$$

$$\sigma_{ka} = \{1 + (v_e \cdot E_e / v_m \cdot E_m)\} \cdot v_m \cdot \sigma_{ma}$$

Matrisin akmasından sonraki elastiklik modülü

$$E_k' = v_e \cdot E_e + v_m \cdot (d\sigma_m/d\epsilon_m)$$

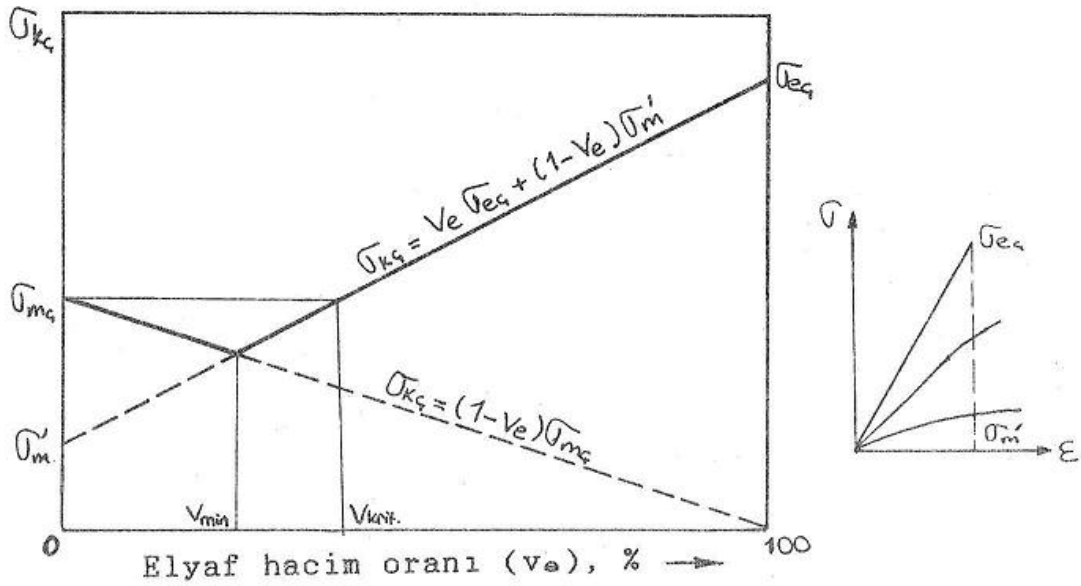
$(d\sigma_m/d\epsilon_m)$: matrisin pekleşme hızı

$$E_k' \approx v_e \cdot E_e$$

olarak hesaplanabilir.

Çekme Dayanımı

Elyaf takviyeli karma malzemelerde takviye etkisinin gerçekleşmesi için bulunması gereken minimum bir elyaf hacim oranı vardır. Bu değerın altında yani çok az elyaf ile yapı-



Şekil 5.9: v_{min} ve v_{krit} değerlerinin bulunması

lan takviyelerde, daha rijit olan ve kuvveti tümüyle taşımak zorunda kalacak olan lifler kırılacaktır. Dolayısıyla böyle bir takviyenin hiçbir yararı olmayacağı gibi kuvveti taşıyacak olan matris kesitini de azalttığından dayanım düşüşlerine de neden olacaktır. Malzeme dayanımının en düşük olduğu noktadaki elyaf hacim oranı v_{min} ile gösterilir.

$v_e < v_{min}$ ise yükü matris taşıyacağından çekme dayanımı:

$$\sigma_{kc} = v_m \cdot \sigma_{mc} = (1 - v_e) \cdot \sigma_{mc} \text{ olur.}$$

$v_e > v_{min}$ ise yükü elyaf ve matris ortak olarak taşırlar. Bu durumda çekme dayanımı

$$\sigma_{kc} = v_e \cdot \sigma_{ec} + (1 - v_e) \cdot \sigma_m'$$

olarak yazılabilir. Burada

σ_m' : Elyafın çekme dayanımına ulaşıldığı anda matrisin taşıdığı gerilme değeridir.

v_{min} değerini bulmak için bu iki bağıntı eşitlenerek $v_e = v_{min}$ yazılır ve

$$v_{min} = (\sigma_{mc} - \sigma_m') / (\sigma_{ec} + \sigma_{mc} - \sigma_m')$$

olarak bulunur.

Şekil 5.9'dan görüldüğü gibi karma malzemenin dayanımının matrisin dayanımından büyük olması için, en az v_{krit}

kadar elyafyla takviye edilmesi gerekmektedir.

$$\sigma_{m\phi} = \sigma_{k\phi} = v_{krit} \cdot \sigma_{e\phi} + (1 - v_{krit}) \cdot \sigma_{m'}$$

$$v_{krit} = (\sigma_{m\phi} - \sigma_{m'}) / (\sigma_{e\phi} - \sigma_{m'}) \cong \sigma_{m\phi} / \sigma_{e\phi}$$

Elyaf hacim oranı teorik olarak en çok %91 olabilir, ancak takviyelerin çok sık olması durumunda liflerin temas yerlerinde kopma olacağından pratikte en çok %80'e çıkılabilir.

5.1.2. Süreksiz Elyafyla Takviyeli Karma Malzemeler

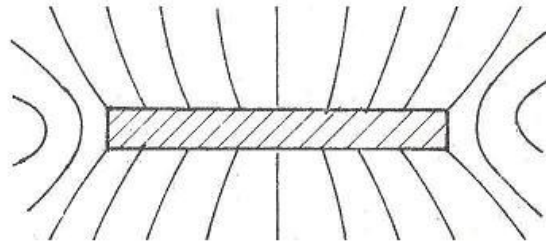
Bu durumda takviye olarak sürekli elyaftan kırılarak elde edilmiş veya kılcal kristaller (whisker) gibi kısa olarak üretilmiş elyaf kullanılmakta olup malzemede oluşan şekil değişimleri artık homojen değildir, Şekil 5.10. Lif uçlarındaki gerilme sıfırdır, bu gerilme lif-matris arayüzeyinde etkiyen kayma gerilmelerinin life ilettiği kuvvetler nedeniyle ortaya doğru giderek artar. Lifin dz boyundaki bir diliminin elyaf ile matris arasında ilettiği dP kuvveti

$$dP = 2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot \tau_z \cdot dz$$

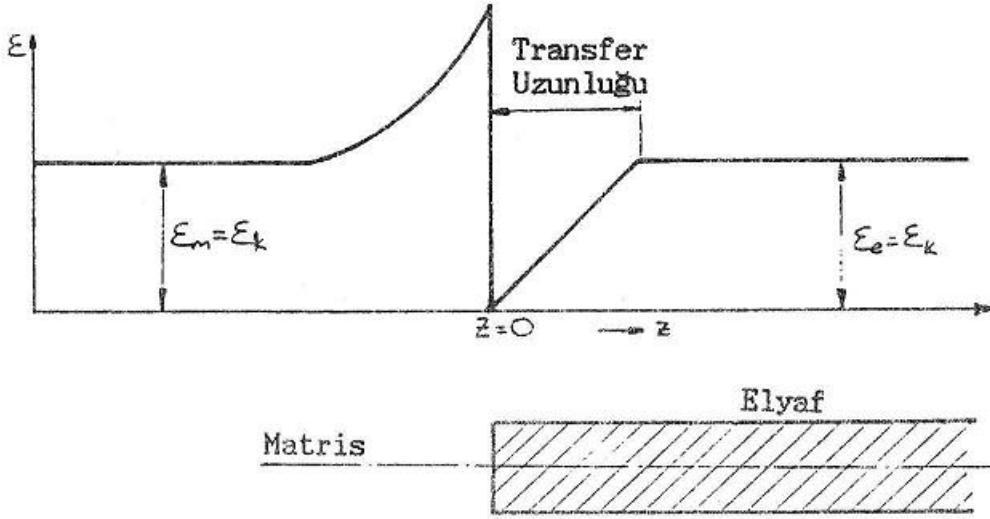
olarak yazılabilir. Burada r_e : elyaf çapı, τ_z : uçtan z uzaklıkta arayüzeye etkiyen kayma gerilmesidir.

Arayüzeylerdeki kayma gerilmesinin değeri sabit ise (τ_0) yukardaki denklemin integre edilmesiyle

$$P = 2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot \tau_0 \cdot z \text{ bulunur.}$$



Şekil 5.10: Süreksiz elyafyla takviyede homojen olmayan şekil değişimleri



Şekil 5.11: Süreksiz elyafıt birim uzamaların dağılımı

Böylece ara yüzeyde ayrılma olmadan uçtan z uzaklıkta lifte etkiyen gerilme değeri olarak

$$\sigma_e = \frac{P}{\pi \cdot r_e^2} = \frac{2 \cdot \tau_0 \cdot z}{r_e}$$

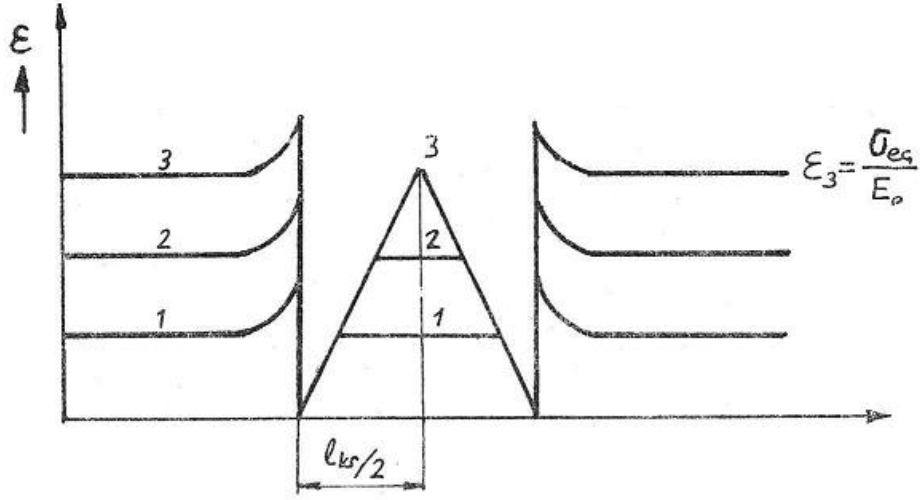
elde edilir. Öte yandan malzemedeki ortalama birim uzama ϵ_k ise, lifteki gerilme uçtan itibaren doğrusal olarak artarak

$$\sigma_{e\max} = E_e \cdot \epsilon_k$$

değerine kadar yükselir.

Matrisin lif ucuna çok yakın olan bölgede kısmen akması nedeniyle, buradaki birim uzama (ϵ_m) karma malzeme içindeki ortalama birim uzama değerini aşar. Lifte ise birim uzama (ϵ_e) uçtan itibaren doğrusal olarak artarak ortalama değere ulaşır. Kuvvetin matris tarafından lifte aktarılması için gerekli uzunluk "transfer uzunluğu" olarak adlandırılır.

Karma malzemeye etkiyen kuvvetler arttırıldıkça transfer uzunluğu ve gerilmenin en büyük değeri Şekil 5.12'de görüldüğü gibi artar. Zorlama arttıkça kuvvetlerin elyafa aktarılması için gerekli olan transfer bölgeleri büyüyerek lifin ortasında buluşabilir, ancak lif uzun ise zorlama lifin çekme dayanımına ulaşılana kadar arttırılabilir. Lif dayanımının tam olarak kullanılabilmesi için lif boyunun



Şekil 5.12: Zorlamalar ile birlikte transfer uzunluğu ve gerilmelerin artması

belirli bir kritik değerden (l_{kr}) büyük olması gereklidir, ancak bu şekilde elyaf-matris ara yüzeyinin en az lifin taşıyabileceği kadar bir kuvveti transfer etmesi sağlanır.

Bu kritik değeri bulmak için Şekil 5.12'deki 3. zorlama seviyesindeki gerilmenin, elyafın çekme dayanımına eşit olması koşulunu yazalım:

$$\frac{2 \cdot (l_{kr}/2) \cdot \tau_o}{r_o} = \sigma_{es}$$

Buradan

$$l_{kr}/d_o = l_{kr}/2 \cdot r_o = \sigma_{es}/2 \cdot \tau_o \quad \text{bulunur.}$$

Bu denklemlerdeki τ_o değeri olarak metal matrislerde matrisin akma gerilmesi τ_{ma} alınabilir. Pekleşen bir metalde ise, lif uçlarında şekil değiştiren bölgelerin akma gerilmesi artacağından malzemenin dayanımı artabilir. Dolayısıyla τ_o yerine en büyük kayma gerilmesini ($\sigma_m/2$) almak daha doğru olacaktır.

Epoksi veya polyester gibi gevrek plastik matris malzemelerinde ise, ayrılma elyaf-matris ara yüzeyinde olur ve lif matris içinde bir boşluk bırakarak çekilir. Bağ önce uç

Çizelge 5.1 : Bazı karma malzemelerde l_{kr}/d_e ile τ_o değerleri

Elyaf	Tungsten tel	Cam	Karbon	Seramik-whisker
Matris	Bakır	Epoksi	Epoksi	Metal
d_e (um)	2000	7,5	7,0	2
σ_{ec} (MPa)	3000	2000	2000	15000
τ_o (MPa)	80	10-35	70	50
l_{kr}/d_e	19	100-30	70	150
l_{kr} (mm)	38	0,75-0,2	0,5	0,32

kısımda ayrılır ve lif boyunca ilerler. τ_o değeri çok değişik faktörlere bağlıdır. Bunlara örnek olarak; plastiğin kendini çekmesi sonucu ortaya çıkan gerilmeler, sürtünme katsayısı, plastiğin akma gerilmesi ve lifler arasındaki plastiğin kalınlığı gösterilebilir. Ancak bu değerlerin deneysel olarak saptanması çok güçtür. Sayısal değerler 5 MN/m^2 (cam elyaf) ile 100 MN/m^2 (karbon elyaf) arasında değişebilir. Bu değerler çok yüksek olması da istenmez, aksi halde malzemenin kırılması sırasında lifin enerji yutarak matristen çekilmesi yerine, kopması söz konusu olur ve karma malzemenin kırılma tokluğu düşer. Değişik malzemeler için l_{kr}/d_e ile τ_o değerleri Çizelge 5.1'de verilmektedir. Görüldüğü gibi kritik oranlar 20 ile 150 arasında değişmektedir, pratikte ise bu değerlerin en az 10 katı alınır. Whisker üretiminde bu kritik uzunluklara ulaşamadığı durumlar olabilir.

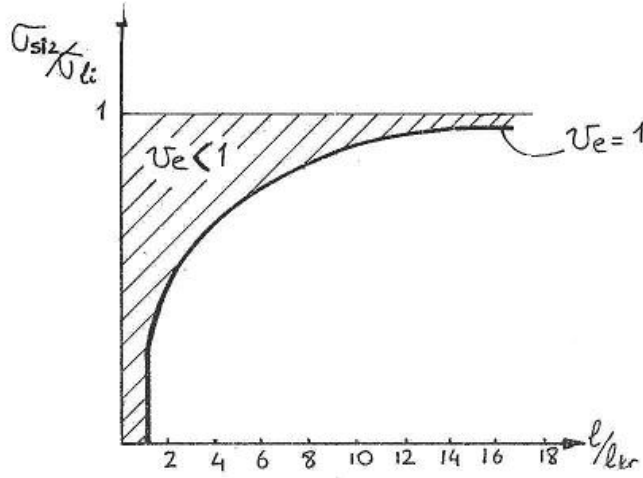
Cekme Dayanımı

Sürekli elyaf takviyeli karma malzemelerde elyafın taşıdığı ortalama çekme gerilmesi şu şekilde yazılabilir:

$$\bar{\sigma}_{ec} = [(1-l_{kr})/l] \cdot \sigma_{ec} + [l_{kr}/l] \cdot (\sigma_{ec}/2)$$

$$\bar{\sigma}_{ec} = \sigma_{ec} \cdot [1 - (l_{kr}/2 \cdot l)]$$

Görüldüğü gibi bu denklemde ortalama gerilmenin σ_{ec} 'ye yakın olabilmesi için $l_{kr}/2 \cdot l \ll 1$ olmalı, yani mümkün olduğu kadar uzun elyaf kullanılmalıdır. Karma malzemenin çekme



Şekil 5.13: Süreksiz ve sürekli elyaf takviyeli karma malzemelerin dayanımları oranının l/l_{kr} ile değişimi

dayanımı ise sürekli elyaf için çıkarılan denklemde σ_{ec} yerine $\bar{\sigma}_{ec}$ koyarak

$$\sigma_{kc} = v_e \cdot \sigma_{ec} \cdot (1 - l_{kr}/2.l) + (1 - v_e) \cdot \sigma_m'$$

şeklinde elde edilir. Sürekli ve süreksiz elyaf için bulunan dayanım değerlerinin oranı v_e ve $l_{kr}/2.l$ 'nin fonksiyonudur.

$$\{(\sigma_{kc})_{süz}/(\sigma_{kc})_{li}\} = f(l_{kr}/2.l, v_e)$$

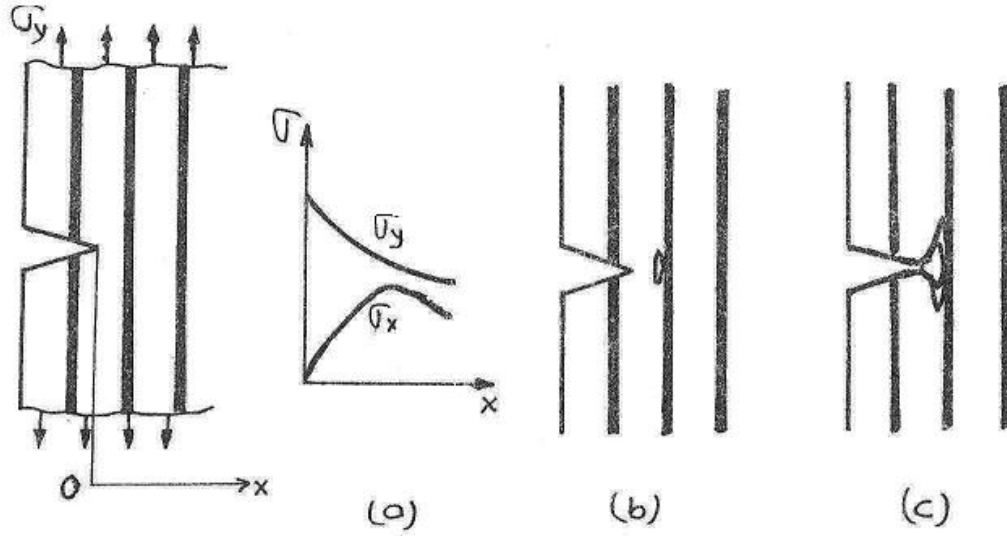
Bu oranın l/l_{kr} ile değişimi Şekil 5.13'te gösterilmiştir. Görüldüğü gibi oran lif boyu arttıkça artmakta, elyaf hacim oranı arttıkça azalmaktadır. $l/l_{kr} > 4$ için oran 1'e çok yakın olur. $v_e < 1$ için iki değer birbirine daha da yaklaşır.

Kırılma Tokluğu

Elyaf takviyeli karma malzemelerde yüksek dayanımın yanında kırılma tokluğunun da yüksek olması istenir. Bunu sağlamak için değişik yöntemler vardır:

- a) Metal matris kullanılması halinde tok olan bu malzeme çatlak ilerlemesini yavaşlatır.
- b) Gevrek matrisli (reçineler) karma malzemelerde,

1. Hasarın elyaf kopması ile değil, matris içinden çekilmesiyle oluşması amaçlanır. Yani kritik boydan kısa ve süreksiz elyaf takviye yapılabilir. Ancak bu durumda malzemenin dayanımı düşer.



Sekil 5.14: a) Çatlak ucundaki gerilme durumu
b,c) Delaminasyon

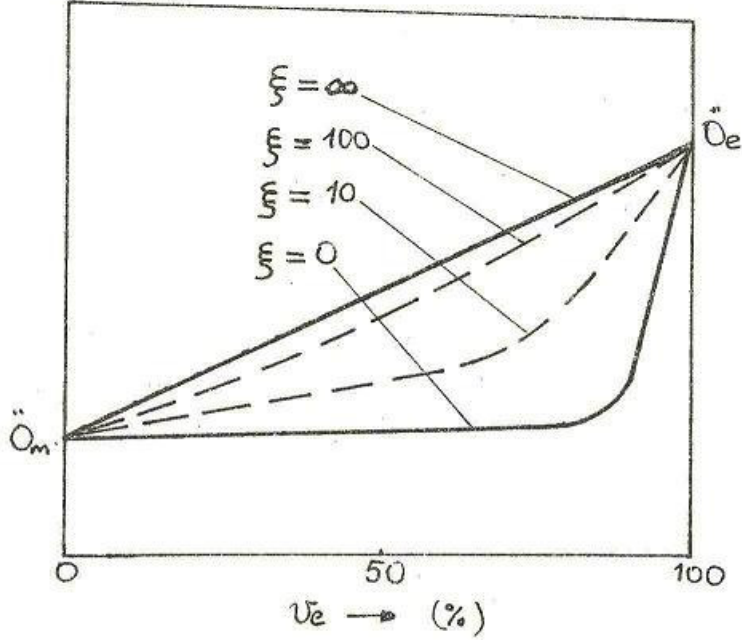
2. Delaminasyondan yararlanarak çatlak ilerlemesi geciktirilebilir. Çatlak ucundaki çok eksenli gerilme durumu çatlağın önünde ve ilerleme yönüne dik doğrultudaki ara yüzeylerde yeni bir çatlak oluşturur ve çatlağın yönünü değiştirerek ilerlemesini yavaşlatır, Şekil 5.14.

5.1.3. Mikromekanik Modeller

Karma malzeme özelliklerinin bileşenlerinin özellikleri yardımıyla hesaplanması için çok değişik öneriler vardır. Bunlar arasında en basiti karışımlar kuralıdır.

Literatürde bu basit kuralın dışında birçok model önerilmektedir; ancak bu teorik, semiampirik veya ampirik modeller genellikle karmaşık bağıntılardan oluşmaktadır. Bunlara bir örnek olarak karışımlar kuralına benzemesi bakımından Halpin ve Tsai'nin önerdiği semi-ampirik bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\sigma_x = \frac{\sigma_m [\sigma_e + \xi \cdot \sigma_m + \xi \cdot v_e \cdot (\sigma_e - \sigma_m)]}{[\sigma_e + \xi \cdot \sigma_m - v_e \cdot (\sigma_e - \sigma_m)]}$$



Şekil 5.15: Halpin-Tsai bağıntısında özellikleri v_e ve v_m ile değişimi

Burada \bar{O}_k karma malzemenin özelliği, ξ ise bir parametredir.

$\xi \rightarrow \infty$ olursa

$$\bar{O}_k = \bar{O}_e \cdot v_e + \bar{O}_m \cdot v_m$$

yani karışımlar kuralında paralel toplama

$\xi \rightarrow 0$ olursa

$$1/\bar{O}_k = v_e/\bar{O}_e + v_m/\bar{O}_m$$

yani karışımlar kuralında seri toplama elde edilmektedir.

Halpin-Tsai denklemi, özelliklerin bu iki sınır arasında bir değere sahip olacağını kabul etmekte ve bunu ξ parametresi ile belirlemektedir. Her bir özellik için ayrı bir ξ değeri sözkonusudur. Özelliklerin değişik hacim oranları ve ξ parametresi ile değişimi Şekil 5.15'te verilmiştir.

5.2. MAKROMEKANİK

5.2.1. Tek Yönde Takviyeli Bir Karma Malzeme Tabakası

Anizotrop Malzemelerin Elastik Davranışı

Karma malzemelerin mekanik özellikleri yöne bağımlıdır ve anizotropi nedeniyle bunların elastik özelliklerini tanımlamak için gerekli sabitlerin sayısı izotrop malzemelere oranla çok daha fazladır. (izotrop malzemedeki sadece iki sabitin bilinmesi yeterlidir; E, ν).

Anizotrop malzemeler için genelleştirilmiş Hooke Kanunu şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \epsilon_{kl}$$

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}$$

$$S_{ijkl} = (C_{ijkl})^{-1}$$

Burada σ_{ij} : gerilme tansörünün bileşenleri
 ϵ_{kl} : şekil değiştirme tansörünün bileşenleri
 C_{ijkl} : elastik rijitlik tansörü
 S_{ijkl} : elastik gevşeklik tansörüdür.

Bu denklemler açık olarak yazıldığında her birinde 9 terim bulunan 9 denklem ortaya çıkar. C_{ijkl} ve S_{ijkl} 4. dereceden tansörler olup 81 sabit içerirler. Ancak kütle kuvvetlerinin olmaması durumunda gerilme ile şekil değiştirme tansörleri simetrik olduğundan ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ve $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}$) sabitlerin sayısı 36'ya düşer.

Mekanikte genellikle kısaltılmış notasyon olarak adlandırılan notasyonun kullanılması ile rijitlik ve gevşeklik tansörlerinin 2. dereceden olması sağlanır. Kısaltılmış notasyonda gerilme ve şekil değiştirme büyüklükleri aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\begin{array}{ll}
\sigma_{11} = \sigma_1 & \epsilon_{11} = \epsilon_1 \\
\sigma_{22} = \sigma_2 & \epsilon_{22} = \epsilon_2 \\
\sigma_{33} = \sigma_3 & \epsilon_{33} = \epsilon_3 \\
\sigma_{23} = \sigma_4 \text{ (= } \tau_{23} \text{)} & 2\epsilon_{23} = \epsilon_4 \text{ (= } \gamma_{23} \text{)} \\
\sigma_{13} = \sigma_5 \text{ (= } \tau_{13} \text{)} & 2\epsilon_{13} = \epsilon_5 \text{ (= } \gamma_{13} \text{)} \\
\sigma_{12} = \sigma_6 \text{ (= } \tau_{12} \text{)} & 2\epsilon_{12} = \epsilon_6 \text{ (= } \gamma_{12} \text{)}
\end{array}$$

Böylece Hooke Kanununun yeni şekli aşağıdaki gibi olur:

$$\sigma_i = C_{ij} \cdot \epsilon_j \quad (j=1..6)$$

$$\epsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j$$

Burada, C_{ij} : elastik rijitlik tansörü

S_{ij} : elastik gevşeklik tansörüdür.

Love notasyonuna göre anizotropik malzemeler için iki boyutlu tansörle gösterilen gerilme şekil değiştirme bağıntısı

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix}$$

şeklinde yazılır. Yukarıdaki matris çarpımını yaparsak;

$$\begin{array}{l}
\sigma_1 = C_{11}.\epsilon_1 + C_{12}.\epsilon_2 + C_{13}.\epsilon_3 + C_{14}.\epsilon_4 + C_{15}.\epsilon_5 + C_{16}.\epsilon_6 \\
\sigma_2 = C_{21}.\epsilon_1 + C_{22}.\epsilon_2 + C_{23}.\epsilon_3 + C_{24}.\epsilon_4 + C_{25}.\epsilon_5 + C_{26}.\epsilon_6 \\
\sigma_3 = C_{31}.\epsilon_1 + C_{32}.\epsilon_2 + C_{33}.\epsilon_3 + C_{34}.\epsilon_4 + C_{35}.\epsilon_5 + C_{36}.\epsilon_6 \\
\sigma_4 = C_{41}.\epsilon_1 + C_{42}.\epsilon_2 + C_{43}.\epsilon_3 + C_{44}.\epsilon_4 + C_{45}.\epsilon_5 + C_{46}.\epsilon_6 \\
\sigma_5 = C_{51}.\epsilon_1 + C_{52}.\epsilon_2 + C_{53}.\epsilon_3 + C_{54}.\epsilon_4 + C_{55}.\epsilon_5 + C_{56}.\epsilon_6 \\
\sigma_6 = C_{61}.\epsilon_1 + C_{62}.\epsilon_2 + C_{63}.\epsilon_3 + C_{64}.\epsilon_4 + C_{65}.\epsilon_5 + C_{66}.\epsilon_6
\end{array}$$

elde edilir. Öte yandan bu matrislerin 36 elemanının tümünün birbirinden bağımsız olmadığı şekil değişimi enerjisi

yardımla gösterilebilir.

Malzeme σ_1 gerilmesi altında $d\epsilon_1$ elastik şekil değişimine uğrarsa, birim hacim başına elastik enerji artışı

$$dW = \sigma_1 \cdot d\epsilon_1$$

olarak yazılabilir. Bu denklemin entegrali alınır

$$\sigma_1 = C_{13} \cdot \epsilon_3$$

olduğundan

$$W = 1/2 (C_{13} \cdot \epsilon_3 \cdot \epsilon_1)$$

bulunur. Benzer şekilde σ_3 gerilmesi altında $d\epsilon_3$ şekil değişimi için hesaplanırsa

$$W = 1/2 (C_{31} \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_3)$$

bulunur. Dolayısıyla bu denklemlerin türevi alınarak

$$\frac{\partial W}{\partial \epsilon_1} = C_{13} \cdot \epsilon_3 \quad \text{ve} \quad \frac{\partial W}{\partial \epsilon_3} = C_{31} \cdot \epsilon_1$$

bulunur. Bir daha kısmi türev alınır

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \epsilon_1 \cdot \partial \epsilon_3} = C_{13} \quad \text{ve} \quad \frac{\partial^2 W}{\partial \epsilon_3 \cdot \partial \epsilon_1} = C_{31}$$

elde edilir. Türev alma sırası türevin değerini değiştirmeyeceğinden $C_{13} = C_{31}$ bağıntısı geçerlidir. Benzer şekilde $S_{13} = S_{31}$ bağıntısı da gösterilebilir. Yani rijitlik ve gevşeklik matrislerinin her ikisinde simetriktir ve birbirinden bağımsız sabit sayısı 21'e düşer.

$$C_{13} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix}$$

Yukardaki eşitlik malzeme özellikleri bakımından hiçbir simetri düzlemi olmayan anizotropik malzemeleri temsil eder.

Böyle bir anizotropik malzemenin diğer adı triklinik malzemedir. Bilindiği gibi karma malzemelerde mekanik davranışlar bakımından bazı simetri düzlemleri vardır.

Eğer malzeme özellikleri sadece bir simetri düzlemine sahipse, gerilme - şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki şekle dönüşür.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix}$$

Burada simetri düzlemi $z=0$ düzlemidir. Böyle bir malzeme monoklinik olarak adlandırılır ve bağımsız elastik sabit sayısı 13' dür.

Eğer malzemede mekanik özellikler bakımından üç simetri düzlemi (ortogonal düzlemler) varsa malzeme ortotropik (ortogonal anizotropik) olarak adlandırılır . Bu durumda bağımsız sabit sayısı sadece 9 olur:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix}$$

Eğer bir malzemede bu simetrilere ek olarak mekanik özelliklerin tüm doğrultularda eşit olduğu bir düzlem varsa, bu tip malzemeler transvers izotropik olarak adlandırılır. Örneğin 1-2 düzlemi özel izotropi düzlemi ise, bu takdirde rijitliklerdeki 1 ve 2 alt indisleri yer değiştirebilir ve

böylece gerilme - şekil değiştirme bağıntısındaki sabit sayısı 5' e düşerek bağıntı aşağıdaki şekli alır:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix}$$

Eğer malzeme özelliklerine ait simetri düzlemleri sonsuz sayıda ise önceki bağıntılar izotropik malzeme durumuna indirgenebilir ve bu durumda rijitlik matrisindeki bağımsız sabit sayısı yalnızca 2' dir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11}-C_{12})/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix}$$

Yukarıda verilen değişik simetri halleri için şekil değiştirme - gerilme bağıntıları ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

Anizotropik (21 bağımsız sabit)

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

Monoklinik (13 bağımsız sabit, z=0 simetri düzlemi için)

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & S_{36} \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & S_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{45} & S_{55} & 0 \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

Ortotropik (9 bağımsız sabit)

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

Transvers izotropik (5 bağımsız sabit)

(1-2 simetri düzlemi hali için)

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

izotropik (2 bağımsız sabit)

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{12} & S_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(S_{11}-S_{12}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix}$$

Elastiklik Matrisinin Bileşenlerinin Malzeme Özellikleri Yardımıyla Saptanması

Ortotropik karma malzemenin elastik davranışını belirleyen bu sabitler ile malzemelerin mühendislik sabitleri olarak adlandırılan E, ν ve G arasındaki bağıntıları bulmak amacıyla tek eksenli çekme veya kayma (kesme) deneyleri yapılır.

a) Takviye Yönünde Çekme

Gerilmeler : $\sigma_1 \neq 0$, $\sigma_i = 0$ (i= 2...6)

Birim uzamalar : $\epsilon_1 \neq 0$
 $\epsilon_2 = -\nu_{12} \cdot \epsilon_1$
 $\epsilon_3 = -\nu_{13} \cdot \epsilon_1$
 $\epsilon_4 = \epsilon_5 = \epsilon_6 = 0$

Bu durumda;

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= S_{11} \cdot \sigma_1 \longrightarrow S_{11} = \epsilon_1 / \sigma_1 = 1/E_1 \\ -\nu_{12} \cdot \epsilon_1 &= S_{21} \cdot \sigma_1 \longrightarrow S_{21} = -\nu_{12} \cdot \epsilon_1 / \sigma_1 = -\nu_{12} / E_1 \\ -\nu_{13} \cdot \epsilon_1 &= S_{31} \cdot \sigma_1 \longrightarrow S_{31} = -\nu_{13} \cdot \epsilon_1 / \sigma_1 = -\nu_{13} / E_1 \end{aligned}$$

bulunur.

b) Kesme

Gerilmeler : $\tau_{12} = \sigma_6 \neq 0$, $\sigma_i = 0$ (i=1...5)

Birim uzamalar : $\epsilon_6 \neq 0$, $\epsilon_6 = S_{66} \cdot \sigma_6 \longrightarrow S_{66} = 1/G_{12}$

Diğer sabitler de benzer deneylerle saptanarak gevseklik matrisi

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{31}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} \end{bmatrix}$$

şeklını alır. Rijitlik matrisi ise $C_{ij} = (S_{ij})^{-1}$ transformasyonu ile saptanabilir.

Ortotropik Tabakalarda Düzlem Gerilme Durumu

Elyaf takviyeli tabakalar çoğunlukla ince olduklarından düzlem gerilme durumunun geçerli olduğu, yani düzleme dik gerilmelerin etkemediği kabul edilebilir ($\sigma_3 = 0$, $\sigma_4 = 0$, $\sigma_5 = 0$).

Bu durumda sabitlerin sayısı daha da azalacağından 6 boyutlu matris yerine 3 boyutlu Q_{ij} matrisi kullanılır. Böylece Hooke bağıntısı

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix}$$

şeklini alır. Burada matrisin bağımsız elemanlarının sayısı 4' e inmiştir ve bunların mühendislik sabitleri cinsinden ifadeleri ise aşağıdaki gibidir.

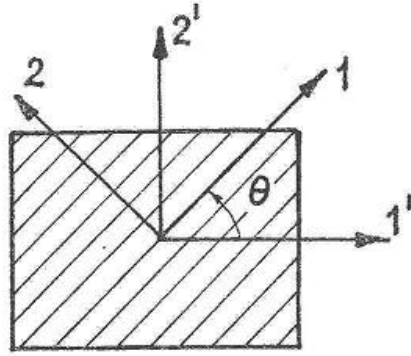
$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad Q_{12} = \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}}$$
$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad Q_{33} = G_{12}$$

Mekanik Davranışın Yöne Bağlı Olarak Değişimi

Buraya kadar ortotropik malzemelerin, malzemenin asal doğrultusundaki gerilme-şekil değiştirme bağıntıları ele alınmıştır. Uygulanan gerilmeler her zaman malzemenin asal eksenleri ile çakışmayabilir. Böyle bir durumda farklı yönlerdeki bağıntılar transformasyon tansörü (T_{ij}) kullanılarak saptanabilir.

Örneğin, etkiyen gerilmeler malzemenin asal doğrultuları 1 ve 2 yönlerinde değil, x ve y yönlerinde etkimesi halinde bu gerilme halinin malzeme asal eksenleri ile çakışan bir koordinatta (Şekil 5.16) ifadesi veya transformasyonu şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$



Şekil 5.16: Herhangi x-y eksenlerinden malzeme asal eksenlerine pozitif yönde dönüş

veya bunun tersi

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}$$

olur. Benzer şekilde

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix}$$

(-1) üsteli matris tersini belirtmektedir ve transformasyon matrisi [T] aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta & 2 \sin \theta \cos \theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta & -2 \sin \theta \cos \theta \\ -\sin \theta \cos \theta & \sin \theta \cos \theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta \end{bmatrix}$$

Bununla beraber bir [R] matrisi,

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

kullanırsa 1/2 çarpanı yok edilir ve

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = [R] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [R] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix}$$

elde edilir.

Eğer gerilmenin uygulandığı ekserler olan x ve y, malzemenin asal eksenleri olan 1 ve 2 eksenleri ile çakışmıyor ise gerilme - şekil değişimi bağıntısı şöyle yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix}$$

$$= [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot [T] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix}$$

$$= [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [R]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Burada, $[T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [R] \cdot [T] \cdot [R]^{-1} = [\bar{Q}]$ ile gösterilirse xy eksenlerine ait gerilme - şekil değiştirme bağıntısı

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

olarak elde edilir. $[\bar{Q}]$ 'nun bileşenleri

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} \cdot \cos^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta + Q_{22} \cdot \sin^4\theta$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta + Q_{12} \cdot (\sin^4\theta + \cos^4\theta)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11} \cdot \sin^4\theta + 2(Q_{12} + 2Q_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta + Q_{22} \cdot \cos^4\theta$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin\theta \cdot \cos^3\theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \sin^3\theta \cdot \cos\theta$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^3\theta \cdot \cos\theta + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66}) \cdot \sin\theta \cdot \cos^3\theta$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta + Q_{66} \cdot (\sin^4\theta + \cos^4\theta)$$

Burada Q_{13} (indirgenmiş Q_{13} rijitlik matrisi yerine) trasforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisini temsil etmektedir.

Aynı şekilde malzeme asal eksenleri ile çakışmayan bir gerilme hali için de şekil değiştirme - gerilme bağıntısı bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{S}] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Burada $[R] \cdot [T]^{-1} \cdot [R]^{-1} \cdot [S] \cdot [T] = [\bar{S}]$ olarak gösterilmiştir.

$$\bar{S}_{11} = S_{11} \cdot \cos^4\theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta + S_{22} \cdot \sin^4\theta$$

$$\bar{S}_{12} = S_{12} \cdot (\sin^4\theta + \cos^4\theta) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta$$

$$\bar{S}_{22} = S_{11} \cdot \sin^4\theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta + S_{22} \cdot \cos^4\theta$$

$$\bar{S}_{16} = (2S_{11} - S_{12} - S_{66}) \sin\theta \cdot \cos^3\theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3\theta \cdot \cos\theta$$

$$\bar{S}_{26} = (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3\theta \cdot \cos\theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin\theta \cdot \cos^3\theta$$

$$\bar{S}_{66} = (S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - 2S_{66}) \sin^2\theta \cdot \cos^2\theta + S_{66} \cdot (\sin^4\theta + \cos^4\theta)$$

Ortotropik Tabakalarda Akma (Kırılma) Kriterleri

Karma malzemelerin elastiklik özellikleri gibi dayanımları da anizotropiktir. Bilindiği gibi izotrop malzemeler için çok eksenli gerilme durumlarında değişik akma kriterleri (Tresca, vonMises v.b.) önerilmiştir. Karma malzemelerin akma (kırılma) kriterleri ise bunlardan farklı olup, burada tek yönde takviyeli ortotropik bir tabakanın düzlem gerilme durumundaki dayanım özellikleri ele alınacaktır. Bu teoriler akma ve kırılmanın mekanizmalarını tam olarak açıklayamamakla birlikte, genellikle deneysel bulgularla uyum sağlamaktadır. Sürekli geliştirilen bu teorilerin en önemlileri en büyük gerilme, en büyük şekil değiştirme, Tsai-Wu ve Tsai-Hill kriterleridir.

a) En Büyük Gerilme Kriteri

Bu teoride etkiyen gerilmenin malzemenin asal eksenleri doğrultusundaki bileşenlerinin, o doğrultudaki malzeme dayanım değerlerini aşması halinde hasarın oluşacağı savunulur. Yani malzemenin taşıyabileceği gerilmeler

$$\sigma_1 \leq X_{1c} \quad (\sigma_1 > 0 \text{ için})$$

$$\sigma_2 \leq X_{2c} \quad (\sigma_2 > 0 \text{ için})$$

$$\sigma_1 \geq -X_{1b} \quad (\sigma_1 < 0 \text{ için})$$

$$\sigma_2 \geq -X_{2b} \quad (\sigma_2 < 0 \text{ için})$$

$$|\tau_{12}| = |\sigma_6| \leq X_s \quad \text{şeklinde sınırlıdır.}$$

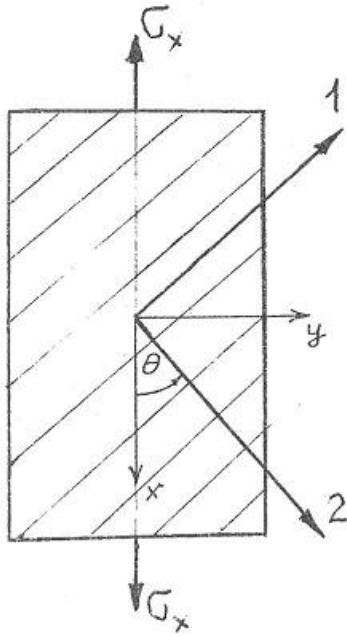
Burada

X_{1c} ve X_{1b} : Takviye doğrultusundaki çekme ve basma dayanımı

X_{2c} ve X_{2b} : Takviyeye dik doğrultudaki çekme ve basma dayanımı

X_s : Kayma dayanımı (her iki yönde aynı)

Takviye doğrultusu ile θ açısı yapan tekil bir kuvvetin yarattığı σ_x gerilmesinin, malzeme asal eksenleri doğrultusundaki bileşenlerini transformasyon matrisi yardımıyla hesaplırsak



Şekil 5.17:

Malzeme ana eksenli (1) ile θ açısı yapan tek eksenli yükleme

$$\sigma_1 = m^2 \cdot \sigma < X_{1\varphi}$$

$$\sigma_2 = n^2 \cdot \sigma < X_{2\varphi}$$

$$|\sigma_6| = mn \cdot \sigma < X_6 \quad \text{yazılabilir.}$$

Burada $m = \cos \theta$ ve $n = \sin \theta$ olduğundan

$$\sigma < \frac{X_{1\varphi}}{\cos^2 \theta}$$

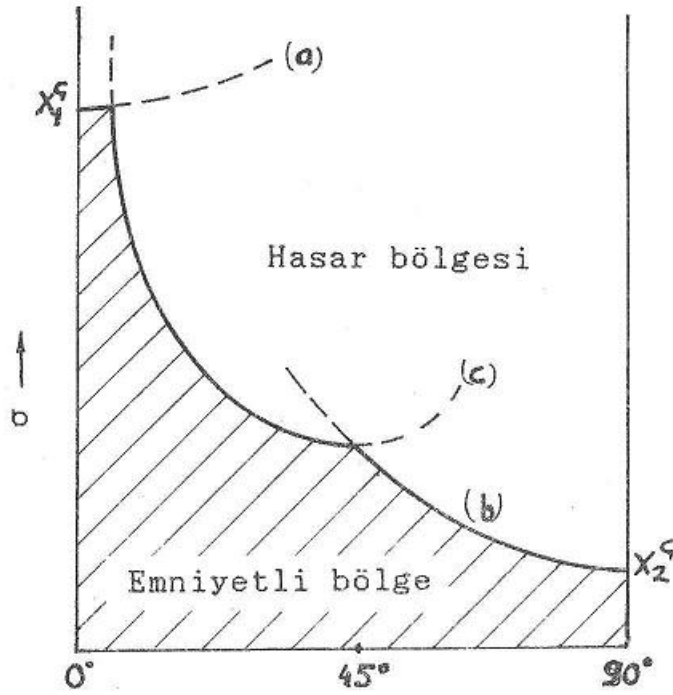
$$\sigma < \frac{X_{2\varphi}}{\sin^2 \theta}$$

$$\sigma < \frac{X_6}{\sin \theta \cdot \cos \theta} \quad \text{bulunur.}$$

Yani bu hasarın oluşmaması için bu üç koşulun aynı anda sağlanması gerekir. Malzemeye etkiyen dış zorlamanın yön değiştirmesi durumunda (yani θ açısı 0° ile 90° arasında değişirken), bu üç gerilmeden sırasıyla biri hasarı oluşturmada kritik duruma gelmektedir, Şekil 5.18.

b) En Büyük Şekil Değiştirme Kriteri

En büyük gerilme kriterinin benzeridir, ancak burada malzemenin uğradığı şekil değişimi bileşenlerinden herhangi birinin buna karşılık gelen sınırı aşması halinde hasarın



Şekil 5.18: En büyük gerilme kriteri

oluşacağı varsayılır. Bu kriter

$$\epsilon_1 \leq \epsilon_1^s \quad (\epsilon_1 > 0 \text{ için})$$

$$\epsilon_2 \leq \epsilon_2^s \quad (\epsilon_2 > 0 \text{ için})$$

$$\epsilon_1 \geq -\epsilon_1^b \quad (\epsilon_1 < 0 \text{ için})$$

$$\epsilon_2 \geq -\epsilon_2^b \quad (\epsilon_2 < 0 \text{ için})$$

$$|\gamma_{12}| = |\epsilon_s| \leq \epsilon_s \quad \text{şeklinde yazılabilir.}$$

Burada

ϵ_1^s ve ϵ_1^b : Takviye doğrultusunda şekil değiştirme sınırları

ϵ_2^s ve ϵ_2^b : Takviyelere dik doğrultuda şekil değiştirme sınırları

ϵ_s : 1-2 düzleminde kayma sınırı (her iki yönde aynı)

Takviye doğrultusu ile θ açısı yapan bir σ_x gerilmesi

$$\sigma_1 = m^2 \cdot \sigma$$

$$\sigma_2 = n^2 \cdot \sigma$$

$$|\sigma_s| = mn \cdot \sigma$$

gerilmelerini yaratır, bunların etkisiyle ortaya çıkacak şekil değişimleri ise

$$\epsilon_1 = (\sigma_1 - \nu_{12} \cdot \sigma_2) / E_1$$

$$\epsilon_2 = (\sigma_2 - \nu_{21} \cdot \sigma_1) / E_2$$

$$\epsilon_s = \sigma_s / G_{12} \quad \text{olacaktır.}$$

Şekil değişimi sınırları yazılarak

$\epsilon_1^\circ = X_1^\circ/E_1$, $\epsilon_2^\circ = X_2^\circ/E_2$ ve $\epsilon_s = X/G_{12}$ bulunur.

Bu değerler yerine konulursa akma (kırılma) kriteri

$$\sigma < \frac{X_1^\circ}{\cos^2\theta - \nu_{12}.\sin^2\theta}$$

$$\sigma < \frac{X_2^\circ}{\sin^2\theta - \nu_{21}.\cos^2\theta}$$

$$\sigma < \frac{X_s}{\sin\theta.\cos\theta}$$

şeklini alır. Görüldüğü gibi bu kriterde bir öncekinden farklı olarak Poisson oranları da dikkate alınmaktadır.

c) Diğer Akma Kriterleri

Bu iki teori dışında hasar oluşumu kriteri olarak değişik öneriler mevcuttur. Bunlara bir örnek olarak, tek bir ampirik bağıntıdan oluşan ve içerdiği katsayılar malzeme özellikleri yardımıyla ifade edilmeye çalışılan Tsai-Hill kriteri aşağıda verilmektedir. Yukarıdaki çok sayıda eşitsizlikten oluşan kriterler yerine bu önerinin kullanılması hesaplamalarda büyük kolaylık sağlamaktadır.

$$(G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 + (F+G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - 2F\sigma_2\sigma_3 \\ 2Lr_{23}^2 + 2Mr_{13}^2 + 2Nr_{12}^2 = 1$$

Üç boyutta geçerli olan bu bağıntıdaki katsayılar, düzlem gerilme durumu için malzemenin dayanım değerleriyle ifade edilirse (bu bağıntının çıkarılışı burada verilmeyecektir),

$$\frac{\sigma_1^2}{(X_1^\circ)^2} - \frac{\sigma_1.\sigma_2}{(X_1^\circ)^2} - \frac{\sigma_2^2}{(X_1^\circ)^2} - \frac{\sigma_s^2}{X_s^2} = 1$$

bulunur. Gerilme bileşenleri 1 doğrultusuyla θ açısı yapan bir σ gerilmesi cinsinden yazılırsa

$$\frac{\cos^4\theta}{X_1^\circ} + \left(\frac{1}{X_s^2} - \frac{1}{X_1^\circ} \right) \sin^2\theta.\cos^2\theta - \frac{\sin^4\theta}{X_2^\circ} = \frac{1}{\sigma^2}$$

elde edilir. Görüldüğü gibi Tsai-Hill kriteri tek bir bağıntı ile ifade edilmektedir.

5.2.2. Çok Sayıda Ortotropik Tabakadan Oluşan Levhalar

Çok Tabakalı Karma Malzemelerin İstiflenme Geometrisi

Elyaf takviyeli karma malzemeler çoğunlukla tek yönde takviyeli çok sayıda ince ortotropik tabakadan oluşur. Bunların istiflenme geometrisi, elyaf doğrultularınının üstten alta doğru sıralanması ile belirtilir. Bu notasyona ait bazı örnekler aşağıda verilmiştir.

$[0^\circ/90^\circ/0^\circ]_T$: Elyaf yönleri levha asal eksenlerine göre 0° ve 90° olacak şekilde yerleştirilmiş üç tabakadan oluşan bir levha.
(T : toplam anlamındadır.)

Simetrik yerleştirmelerde s alt indisi ile notasyon kısaltılabilir.

$$[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]_T = [0^\circ/90^\circ]_s$$

Levha içinde bir tabaka birden çok kullanılırsa bu sayı indis olarak verilebilir.

$$[0^\circ/90^\circ/90^\circ/0^\circ]_T = [0^\circ/90^\circ_2/0^\circ]_T$$

Ters açılı yerleştirmelerde ise şöyle bir kısaltma kullanılabilir.

$$[0^\circ/+45^\circ/-45^\circ]_s = [0^\circ/\pm 45^\circ]_s$$

Tek sayıda tabakadan oluşan levhalarda orta düzlem bir tabakanın ortasından geçer, bu orta tabakayı belirtmek için o tabaka üzerine bir çizgi çizilir.

$$[0^\circ/90^\circ/0^\circ]_T = [0^\circ/\overline{90^\circ}]_s$$

Klasik Laminasyon Teorisi

iki veya daha fazla tabakadan oluşan levhalar, malzeme asal eksenleri çeşitli açılar yapan zorlamalara dayanabilecek şekilde ve tabakaların değişik doğrultularda istiflenmesiyle rettilirler. Bu tip bir levhanın rijitlikleri bu bölümde anlatılacak olan klasik laminasyon teorisi yardımıyla hesaplanabilir. Tabakaların değişik yönlendirmeleri sonucunda levhada belirli bir asal eksen olmayabilir. Klasik laminasyon teorisi bir tabakadan yola çıkıp bir levhanın davranışını incelemektedir.

Tek Bir Tabakanın Gerilme - Şekil Değiştirme Bağıntısı

Düzlem gerilme altındaki bir ortotropik tabakanın malzeme asal eksenlerindeki gerilme - şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix}$$

Tabaka düzleminde olan herhangi bir eksen takımındaki gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ise aşağıdaki gibidir:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix}$$

Bu sayede değişik açılardaki tabakalar için transforme edilmiş indirgenmiş rijitlik matrisinin (\bar{Q}_{ij}) hesaplanması mümkün olur. Çok sayıda tabakadan oluşan bir levhanın k. tabakasının gerilme - şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki gibidir:

$$\{ \sigma \}_k = [\bar{Q}]_k \cdot \{ \epsilon \}_k$$

Çok Tabakalı Bir Levhada Gerilme - Şekil Değiştirme Davranışı

Bir levhanın kalınlığı boyunca gerilme - şekil değiştirme değişiminin hesaplanması için levhanın uzama ve eğilme rijitliklerinin bilinmesi gerekir. Birçok tabakadan oluşan levhaların mekanik davranışının incelenmesinde şu kabuller yapılır:

a) Tabakalar arasındaki bağlar mükemmeldir ve kayma etkisiyle deforme olmazlar, levha tek bir tabaka gibi davranır.

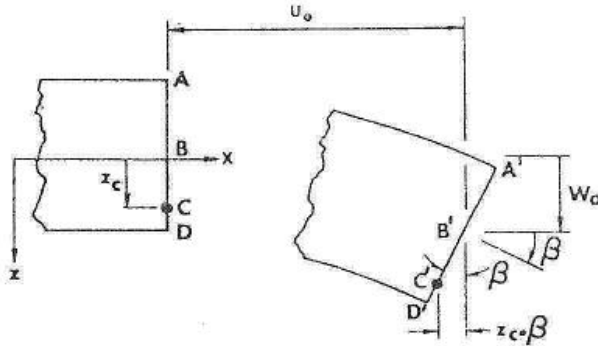
b) Levhanın orta düzlemine dik düzlem, levha şekil değiştirse dahi orta düzleme dik kalır. Yani orta düzleme dik düzlemlerde kayma olmaz.

$$\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$$

c) Normal doğrultusunda kalınlığın sabit kaldığı kabul edilir.

$$\epsilon_z = 0$$

Çok tabakalı ve elyaf takviyeli bir levha alalım ve x , y , z doğrultularındaki u , v , w yerdeğişimlerini arayalım. Bir ABCD düzleminin yer değiştirmesini xz -düzleminde inceleyelim.



Şekil 5.19: Bir levhadaki yer değişimleri

Orta düzlemdaki B noktasının x doğrultusunda yer değişimi u_0 ise düzlem üzerindeki diğer noktalar için (örneğin C noktası)

$$u = u_0 - z_0 \cdot \beta$$

yazılabilir. Burada β , x doğrultusunda levha orta düzleminin eğimidir.

$$\beta = \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

u yerdeğişimi levha kalınlığı boyunca herhangi bir z noktasında

$$u = u_0 - z \cdot \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

olarak yazılabilir. Aynı şekilde y doğrultusundaki v yerdeğişimi de

$$v = v_0 - z \cdot \frac{\partial w_0}{\partial y}$$

olur. Bilindiği gibi $\epsilon_x = \gamma_{xz} = \gamma_{zx} = 0$ dir. Bu yüzden şekil değişimleri olarak sadece ϵ_x , ϵ_y , γ_{xy} söz konusudur. Bu değerler yer değişimleri cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 2 \cdot \epsilon_{xy}$$

Dolayısıyla yukardaki bağıntıların türevi alınarak

$$\epsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}$$

$$\epsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2 \cdot z \cdot \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \cdot \partial y} = 2 \cdot \epsilon_{xy}$$

veya

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \cdot \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

Bu denklemdeki ϵ_x^0 , ϵ_y^0 , γ_{xy}^0 orta düzlemdeki şekil değişimleridir ve şu şekilde ifade edilebilirler.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial u_0 / \partial x \\ \partial v_0 / \partial y \\ \partial u_0 / \partial y + \partial v_0 / \partial x \end{bmatrix}$$

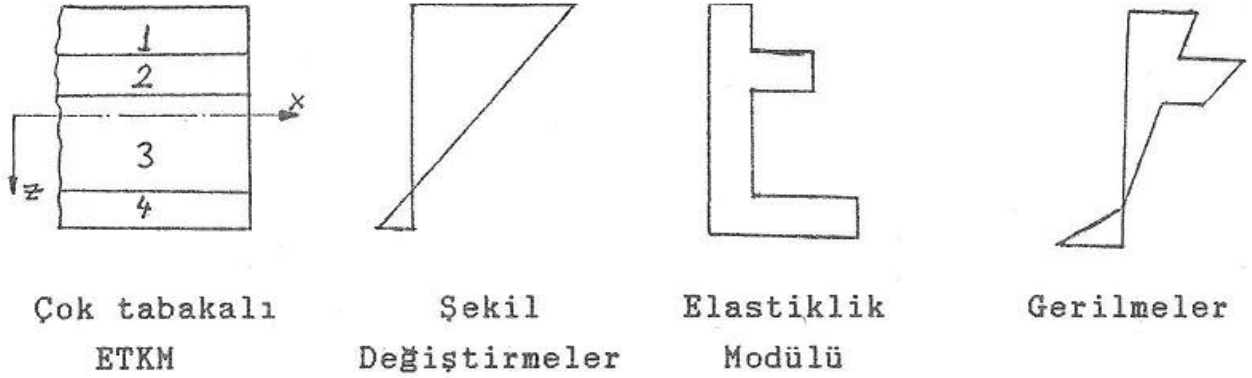
orta düzlemdeki eğrilikler ise aşağıdaki gibi ifade edilirler.

$$\begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \partial^2 w_0 / \partial x^2 \\ \partial^2 w_0 / \partial y^2 \\ 2 \cdot \partial^2 w_0 / \partial x \partial y \end{bmatrix}$$

Bu denklemdeki son terim orta düzlemin bükülme eğriliğidir. Yukarıdaki denklemdeki kalınlık boyunca şekil değişimi değerinin gerilme-şekil değiştirme bağıntısında yerine konulmasıyla k . tabakadaki gerilme değeri levha orta düzleminin şekil değişimleri ve eğrilikleri yardımıyla aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{13} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{23} \\ \bar{Q}_{13} & \bar{Q}_{23} & \bar{Q}_{33} \end{bmatrix}_k \cdot \left[\begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \cdot \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \right]$$

Levhanın her bir tabakası için Q_{13} matrisi farklı olabileceğinden, levha kalınlığı boyunca gerilme değişimi sürekli değildir buna karşın tabakalar arası bağlar mükemmel olduğundan şekil değişimlerindeki süreklilik bozulmaz.



Şekil 5.20 : Levha kalınlığı boyunca şekil değişimi ve gerilmenin değişimi

Bir Levhaya Etkiyen Bileşke Kuvvetler ve Momentler

Bir levhaya etkiyen bileşke kuvvet ve momentler her bir tabakadaki gerilmelerin levha kalınlığı boyunca integre edilmesi ile elde edilir.

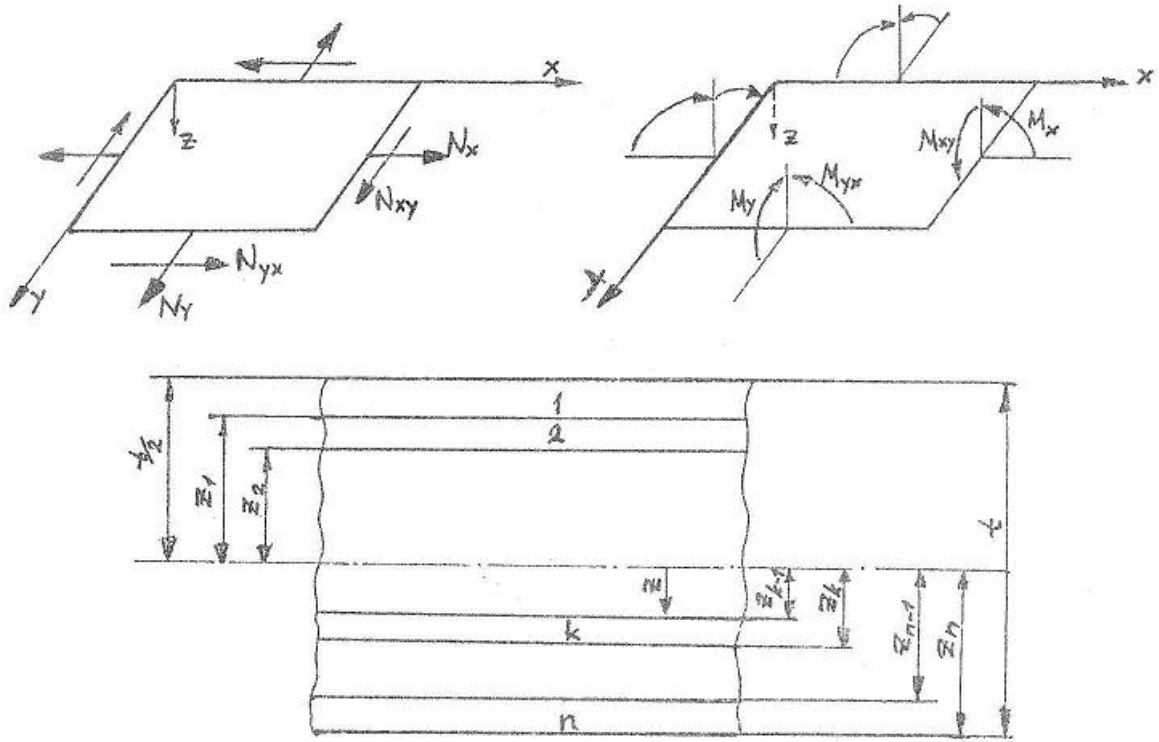
$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x \cdot dz$$

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x \cdot z \cdot dz$$

Burada N_x levha enine kesitinin birim genişliği başına etkiyen kuvvet, M_x de birim genişlik başına etkiyen momenttir (Şekil 5.21 a).

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k \cdot dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k \cdot dz$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k \cdot z \cdot dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}_k \cdot z \cdot dz$$



Şekil 5.21 : a) Bir levhaya etkiyen kuvvet ve momentler
b) n tabakalı bir levhada koordinatlar

Yukarıdaki denklemlerdeki z_k ve z_{k-1} , levhanın z doğrultusundaki kalınlık koordinatlarıdır ve $z_0 = -t/2$ ' dir (Şekil 5.21 b). Bu bileşke kuvvet ve momentler integral alındıktan sonra z ' den bağımsızdırlar fakat x ve y ' nin fonksiyonudurlar.

Her bir tabaka için bilinen gerilme-şekil değiştirme bağıntıları yardımıyla çok tabakalı levhanın gerilme - şekil değiştirme bağıntısı aşağıdaki şekle dönüştürülebilir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z \cdot dz \right]$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left[\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} z \cdot dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} z^2 \cdot dz \right]$$

ϵ_x^0 , ϵ_y^0 , γ_{xy}^0 , K_x , K_y ve K_{xy} z' in fonksiyonu değildirler. Bunlar orta düzleme ait değerlerdir. Bu yüzden toplam işareti içinden çıkartılabilir ve yukardaki denklemler şu şekli alırlar:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{12} & A_{22} & A_{23} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} \\ B_{13} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} \\ D_{13} & D_{23} & D_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

Burada;

A_{1j} : Uzama rijitlik matrisi

B_{1j} : Birleşme rijitlik matrisi

D_{1j} : Eğme rijitlik matrisini göstermektedir.

$$A_{1j} = \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{1j})_k \cdot (z_k - z_{k-1})$$

$$B_{1j} = 1/2 \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{1j})_k \cdot (z_k^2 - z_{k-1}^2)$$

$$D_{1j} = 1/3 \sum_{k=1}^N (\bar{Q}_{1j})_k \cdot (z_k^3 - z_{k-1}^3)$$

B_{1j} matrisi eğme ile uzama arasındaki ilişkiyi temsil eder. B_{1j} terimi var olan çok tabakalı bir levhada, eğme ve/veya dönme yaratmadan tabakayı çekmenin olanağı yoktur. Yani uzama kuvveti yalnızca uzama şekil değişimleri değil aynı zamanda levhada eğme ve/veya dönme de yaratır. Aynı şekilde levhaya moment uygulandığında uzama ve kısalmalar da söz konusudur.

Çok Tabakalı Levhalarda Akma (Kırılma) Kriterleri

Çok tabakalı bir levhanın kırılma kriteri içerdiği tabakaların özellikleri ile doğrudan ilgili olmalıdır. Böyle bir kriterin önce her bir tabakadaki gerilme seviyesini, daha sonra da tabakaların herhangi birinin hasara uğrayıp uğramayacağını belirlemesi gereklidir. Ancak bir çok durumda tek bir tabakanın hasara uğraması tüm levhanın hasarı anlamına da gelmeyebilir. Tek bir tabakasının hasara uğraması ile levhanın rijitliği değişir, fakat buna rağmen levha kırılmaya neden olan kuvvetten de yüksek zorlamaları taşıyabilir.

Karma malzemelerin karmaşık yapıları ve anizotropik özelliklerinden dolayı, sözkonusu olabilecek tüm hasar mekanizmalarını ve bunların süperpozisyonunu kapsayan bir kırılma kriterinin geliştirilmesi oldukça güçtür ve bu dersler kapsamında önerilen teorilerin ayrıntılarına girilmeyecektir. Ayrıca gerek malzemenin üretimi, gerekse deneylerin yapılışındaki kaçınılmaz hatalar nedeniyle, önerilen bu teorilerin geçerliliğinin incelenmesinde de büyük sapmalar oluşmakta ve bu durum teorilerin doğruluğunun yargılanmasında güçlükler yaratmaktadır.

Çok tabakalı bir levhanın dayanımını etkileyen başlıca faktörler şunlardır:

- Tabakaların dayanımı
- Tabakaların rijitliği
- Tabaka kalınlıkları
- İstiflenme geometrisi
- Tabakaların ısıl genleşme özellikleri
- Matrisin sertleştirme (cure) sıcaklığı

Görüldüğü gibi mekanik ve geometrik özellikler yanında ısıl özellikler de tabaka dayanımı bakımından belirleyici olmaktadır. Isıl genleşme katsayıları sıcaklık değişimleri sırasında ortaya çıkan ısıl gerilmeleri, sertleştirme sıcaklığı ise oda sıcaklığındaki artık gerilmeleri etkilemekte ve bu şekilde levhanın ısıl zorlamalar altındaki davranışı belirlenmiş olmaktadır.

5.2.3. Bazı Özel Levhaların Rijitlik Matrisleri

Yukarıda en genel hal için verilmiş olan rijitlik ifadeleri ile kuvvet ve moment denklemleri özel durumlar için oldukça basitleşmektedir.

Tek bir izotropik tabakadan oluşan levha

Malzeme özellikleri E, ν ve kalınlığı t olan bir izotropik tabakanın oluşturduğu levha için rijitlik elemanları aşağıdaki bağıntılara indirgenebilir.

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= \frac{E \cdot t}{1 - \nu^2} = A & D_{11} &= \frac{E \cdot t^3}{12(1 - \nu^2)} \\
 A_{12} &= \nu A & B_{1j} &= 0 & D_{12} &= \nu D \\
 A_{22} &= A & & & D_{22} &= D \\
 A_{18} &= 0 & & & D_{18} &= 0 \\
 A_{28} &= 0 & & & D_{28} &= 0 \\
 A_{88} &= \frac{E \cdot t}{2(1 + \nu)} = \frac{1 - \nu}{2} A & D_{88} &= \frac{E \cdot t^3}{24(1 + \nu)} = \frac{1 - \nu}{2} D
 \end{aligned}$$

Görüldüğü gibi oluşan kuvvetler yalnızca levhanın orta düzleminin şekil değişimine ve oluşan momentlerde orta düzlemin eğriliklerine bağlıdır.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & A & 0 \\ A & A & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \chi_{xy}^0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & D & 0 \\ D & D & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

$$D = \frac{A t^2}{12}$$

$B_{1j}=0$ olduğu için izotropik bir levhanın eğilme ve uzaması arasında bir bağıntı mevcut değildir.

Tek bir ortotropik tabakadan oluşan levha

Kalınlığı t ve tabaka rijitlikleri \bar{Q}_{1j} olan bir ortotropik tabakadan oluşan levhanın rijitlikleri aşağıdaki gibidir.

$$A_{1j} = \bar{Q}_{1j} \cdot t \quad B_{1j} = 0 \quad D_{1j} = \frac{\bar{Q}_{1j} \cdot t^3}{12}$$

Yine eğilme ve uzamalar arasında bir bağıntı olmadığı için kuvvet ve momentler aşağıdaki gibi olacaktır.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x^0 \\ \epsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

izotropik levhalardan farklı olarak burada uzama kuvvetleri uzama şekil değişimlerine olduğu kadar kayma şekil değişimine de bağlıdır. Aynı şekilde kayma kuvveti N_{xy} , kayma şekil değişimi γ_{xy}^0 'ya olduğu kadar uzama şekil değişimleri ϵ_x^0 ve ϵ_y^0 'nada bağlıdır. Benzer olarak oluşan momentlerin tümü hem eğrilikler K_x ve K_y 'ye hem de dönmeyi ifade eden K_{xy} 'ye bağlıdır. Kuvvet ve moment eksenlerinin malzeme asal eksenleri ile çakışması halinde, bu özel durum için \bar{Q}_{1j} yerine Q_{1j} kullanılacak ve A_{16} ile A_{26} bileşenleri sıfır olacaktır.

Cok Tabakalı Simetrik Levhalar

Orta düzlem etrafında hem geometri hem de malzeme özellikleri bakımından simetrik olan levhalarda da genel rijitlik denklemleri oldukça basitleştirilebilir. Özellikle $(\bar{Q}_{1j})_k$ ve kalınlıklar t_k 'nin simetrisinden dolayı tüm

birleşme rijitlikleri yani B_{13} terimleri sıfır olur. Eğilme ve uzama arasındaki bağıntının sıfırlanması iki önemli pratik sonuca sebep olur. Bunların ilki, bu tip levhaların incelenmesi genellikle birleşme terimine sahip levhalarinkinden daha kolaydır. İkinci olarak simetrik levhalar sertleşme operasyonunu takip eden soğuma esnasında kaçınılmaz büzülme-lerden dolayı bir burkulma göstermezler. Sonuç olarak özel koşullar simetrik olamayan bir levha kullanımını gerektirmediği sürece, simetrik levhalar kullanılırlar. Simetrik levhalarda kuvvet ve momentler aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{12} & A_{22} & A_{23} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} \\ D_{13} & D_{23} & D_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}$$

BOLUM 6

BAZI ETKM'LERİN ÖZELLİKLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Gelişmiş karma malzemeler dayanım, rijitlik, tokluk ve hafiflik gibi özellikler birlikte düşünüldüğünde alışlagelmiş metal malzemelerden daha üstündürler. Kompozit malzemelerde takviyelerin miktarı ve geometrik düzeni temel kullanım özelliklerini belirleyen en önemli faktördür. Genellikle elyaf yönünde en iyi dayanım özellikleri, buna dik yönde ise en düşük değerler elde edilir. Çizelge 6.1'de görüldüğü gibi iki yönlü ve çok yönlü takviye durumunda özellikler daha dengelidir. ($0^\circ / 90^\circ$) düzeninde 0° ve 90° doğrultularındaki dayanımlar en yüksek olup birbirine eşittir. 45° açı yapan doğrultuda ise en düşük dayanımlar

Çizelge 6.1: Takviye biçiminin özelliklere etkisi

Takviye biçimi	Tek yönlü		iki yönlü		Dokuma		Keçe
	0°	90°	$0^\circ / 90^\circ$	$0^\circ / 90^\circ$	$0^\circ / 90^\circ$	Çok yönlü	
Ölçme yönü	0°	90°	0°	45°	0°	45°	her yönde
Çekme modülü (GPa)	77	6	39	7	32	7	21
Çekme dayanımı (MPa)	1400	28	644	98	525	210	200
Basma modülü (GPa)	77	6	39	7	33	7	-
Basma dayanımı (MPa)	280	140	203	126	175	126	-
Eğme modülü (GPa)	77	-	-	-	28	-	19
Eğme dayanımı (MPa)	630	-	-	-	350	-	249

elde edilir. Dokuma biçimindeki takviyelerde ise takviyenin etkisi biraz daha düşüktür.

Bu bölümde yaygın olarak kullanılan bazı elyaf-matris çiftleri teker teker ele alınarak bu karma malzemelerin özellikleri ve kullanım yerleri özetlenecektir.

6.1. CAM ELYAF TAKVİYELİ PLASTİKLER (C T P)

Cam takviyeli plastiklerde uygulanan üretim yöntemi ve buna bağlı olarak elde edilen elyaf hacim oranı, özellikleri etkileyen en önemli faktördür. Çizelge 6.2'de epoksi reçine içinde %50 hacim oranında takviye içeren CTP'lerin mekanik özellikleri verilmektedir.

CTP - malzemelerin özelliklerinin zamanla değişip değişmediği uzun yıllardır incelenen bir konudur. Ultraviyole ışınları ve nemin olumsuz etkileri bulunduğu bilinmektedir. Ultraviyole etkisinden korumak amacıyla koruyucu boya tabakaları uygulanmakta, ancak nemin etkisini önlemede boya ve organik koruyucu tabakalar yetersiz kalmaktadır. Nemin etkisi elyafa koruyucu bir tabaka (sizing) uygulanarak azaltılmaktadır. Tam bir koruma ise yüzeye ince folyalar kaplanarak sağlanabilir. Öte yandan uzun yıllar kullanılmış CTP malzemeler üzerinde yapılan incelemeler dayanım düşüşlerinin çok önemli seviyelerde olmadığını göstermiştir.

Çizelge 6.2: %50 Cam Takviye İçeren Epoksi Matrisli Karma Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Elyaf türü	E-camı	S-camı	Kuvarz
Yoğunluk (g/cm ³)	1,8	1,7	1,8
Çekme dayanımı, tek yönlü (MPa)	1150	1400	1200
, dokuma	420	595	495
Çekme modülü , tek yönlü (GPa)	42	56	40
, dokuma	24	28	21
Basma dayanımı, dokuma (MPa)	350	420	280

CTP malzemelerden değişik amaçlarla yararlanılmaktadır, uygulama alanlarına bazı örnekler Çizelge 6.3'te toplu olarak verilmiştir. Çizelge 6.4'te ise CTP kullanımının hangi sektörlere ne oranda dağıldığını gösterilmektedir. Genel kullanım içinde payı en düşük olmasına rağmen uzay ve uçak sanayi en gelişmiş parçaların kullanıldığı alanlardır. Yapı sektöründe prefabrik ev ve banyo gereçleri üretimi en yaygın kullanım yerleridir. Tüketim mallarına örnek olarak sörfler, tenis raketleri, kayaklar v.s. gösterilebilir. CTP'lerin kimyasal davranışları kullanılan matris reçinesinin özellikleri ile belirlendiğinden, kullanım yerine en uygun reçinenin seçimi çok önemlidir. Elektrik endüstrisinde CTP

Çizelge 6.3: Değişik Yöntemlerle Üretilen CTP'lerin Kullanım Alanları

<u>ELYAF SARMA</u>	<u>PÜSKÜRTME VE EL YATIRMA</u>
Basınçlı tüpler	Tekneler
Silolar	Silo
Borular	Oto karoserisi
Füze gövdeleri	Motorsiklet
	Mobilya
<u>KAPALI KALIP</u>	Kamyon
Oto gövdeleri	Ev
Kaplar	Depolar
Kimyasal gereçler	Yüzme havuzları
Elektrik aletleri	Banyo küvetleri
Ev aletleri	
Depolar	<u>TORBA KALIPLAMA</u>
	Uçak parçaları
<u>PROFİL ÇEKME</u>	Pervane kanatları
Çubuklar	Yüksek dayanımlı parçalar
Borular	
Profiller	<u>ENJEKSİYON (termoplastikler)</u>
Yapı elemanları	Otomotif parçaları
Elektrik tesisat malz.	Ev aletleri

Çizelge 6.4: CTP Uygulamalarının Sektörlere Dağılımı

Kara taşımacılığı	% 33
Deniz taşımacılığı	% 19
Yapı sektörü	% 14
Korozyona dayanıklı ürünler	% 10
Ev aletleri	% 6
Tüketim malları	% 6
Elektrik tesisatı	% 5
Uçak ve uzay sanayi	% 2
<u>Diğer</u>	<u>% 5</u>
TOPLAM	%100

yalıtkanlığı nedeniyle tercih edilmektedir. Deniz taşıtlarında CTP'nin kullanılmaya başlanması bu alanda bir devrim yaratmıştır. Petrol fiyatlarının artmasından sonra kara taşımacılığında hafiflik ve dolayısıyla CTP kullanımı büyük önem kazanmıştır.

6.2. KARBON ELYAF TAKVİYELİ KARMA MALZEMELER (KTKM)

Yüksek zorlamaların sözkonusu olduğu parçalarda çok yaygın olarak kullanılan karbon/epoksi karma malzemelerin mekanik özellikleri Çizelge 6.5'te özetlenmiştir

Yorulma dayanımı bakımından, karbon takviyeli karma malzemeler metal malzemelerden daha üstündür.Çizelge 6.6'daki çentikli ve çentiksiz parçalar için yorulma dayanımları karşılaştırılmaktadır. Yaklaşık izotrop olan ($0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$) ile 2024-T4 alüminyum alaşımının karşılaştırılması özellikle ilginçtir, statik dayanımın daha düşük olmasına rağmen, hem çentikli, hemde çentiksiz parçalar için KTKM'nin yorulma dayanımı daha yüksektir. Öte yandan bu karma malzemenin yoğunluğunun, alüminyumunkinin yarısı, çeliğinkinin ise beşte biri olduğu hatırlanırsa hafifliğin önemli olduğu uygulamalarda yaklaşık izotrop olan karma malzemelerin dahi metallere göre daha üstün olduğu ortaya çıkar.

Çizelge 6.5: Karbon/Epoksi Karma Malzemenin Özellikleri

Karma Malzeme Türü	En yüksek değerler			
	Çekme		Basma	
	Dayanım (MPa)	El.modülü (GPa)	Dayanım (MPa)	El.modülü (GPa)
Kırılmış elyaf içeren hazır kalıplama bileşimi (izotrop)	357	110	476	-
YD elyaf (0°)	1650	140	1008	115
YD elyaf (0°/±45°)	504	58	511	51
OD elyaf (0°)	1477	149	1428	133
OD elyaf (0°/±45°)	511	68	511	65
YM elyaf (0°)	1260	218	770	179
Dokuma, OD elyaf	518	71	518	64

Çizelge 6.6: Karbon Takviyeli Karma Malzeme ile Diğer Bazı Malzemelerin Özelliklerinin Karşılaştırılması

Malzeme Türü	Takviye düzeni	Statik çekme Yorulma dayanımı (MPa)		
		dayanımı (MPa)	($N_s=10^7$ ve $R=0,1$ için) çentiksiz	çentikli
OD karbon/epoksi	0°	1155	812	420
	0°/90°	770	455	420
	0°/±45°/90°	406	315	210
Kevlar-49/epoksi	0°	1260	882	-
2024 Al alaşımı	-	539	294	196
Cam/epoksi	0°	1860	280	-

Karbon takviyeli reçine matrisli karma malzemelerde ısıl veya elektriksel iletkenlikler elyaf yönünde çok iyi, buna dik yönde ise çok düşüktür. Ayrıca metalsel malzemelerle yapılan birleştirmelerde dikkatli olmak gerekir, çünkü temas

Çizelge 6.7: KTKM/epoksi,CTP ve Çeliğin Fiyat Karşılaştırması

MALZEME	Özgül çekme dayanımı	Özgül rijitlik	Özgül yor. dayanımı	Fiyat bir.day.	Fiyat bir.rijt.	Fiyat bir.yor day.
Karbon/epoksi	4	5	15	17,5	14	4,7
C T P	4	0,85	4	1,7	8,4	1,9
Çelik	1	1	1	1	1	1

halinde galvanik korozyon tehlikesi ortaya çıkar.Örneğin alüminyum perçin kullanılırsa bunların zamanla korozyon nedeniyle hasara uğramaması için uygun yalıtkan tabakaların kullanılması veya katodik koruma uygulanması gerekir.

Karbon takviyeli karma malzemeler günümüzde genellikle uçak ve uzay sanayinde kullanılır. Bu malzemenin mükemmel özellikleri şimdiye kadar düşünülemediği parçaların dahi gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Ancak kompozit yapılar örneğin çelikten daha pahalıdır. Çizelge 6.7 karbon/epoksi, CTP ve çelik malzemeleri fiyat bakımından karşılaştırmaktadır. Bu çizelgeden karbon takviyeli karma malzemelerin daha pahalı olduğu açıkça görülmektedir. Ancak kullanımın giderek yaygınlaşmasıyla karma malzeme fiyatlarının hızla düşeceği muhakkaktır.

Basta uçak ve uzay sanayi olmak üzere, karbon takviyeli karma malzemeler değişik alanlarda kullanılmaktadır. Çizelge 6.8 bu uygulamalara ait değişik örnekleri içermektedir.

6.3. BOR ELYAF TAKVİYELİ KARMA MALZEMELER (BTKM)

Bor/epoksi karma malzemelerin bazı özellikleri Çizelge 6.9'da verilmektedir. Çekme dayanımı YD-karbon elyaf ile aynı olan bor elyafın 2480 MPa'ya varan basma dayanımı, yaklaşık iki katıdır. Öte yandan maliyetler bakımından, bor elyaf bütün diğer türlerden daha pahalıdır. Bu nedenle hem bor elyafın yüksek dayanım özelliklerinden yararlanmak, hem de karma malzemenin fiyatını çok yükseltmemek için, bor elyaf

Çizelge 6.8: Karbon Takviyeli Karma Malzemelerin Kullanım Alanlarına Örnekler

<u>UÇAK VE UZAY SANAYİ</u>	<u>MAKİNA SANAYİ</u>
Uzay mekiği	Türbin ve kompresör kanatları
Kargo kapıları	Santrifujlar
Roket gövdeleri	Rüzgar değirmeni kanatları
Uçaklar	Petrol boruları (deniz sondajı)
Çeşitli kanatcıklar	
Ana iniş takımı kapağı	<u>TIP</u>
Koltuklar	Tekerlekli sandalyeler
Taban kirişleri	Protezler
<u>TAŞIMACILIK</u>	<u>SPOR MALZEMELERİ</u>
Karoseri	Oltalar
Yaprak yaylar	Raketler
Şaftlar	Kayaklar
Taşınabilir köprüler	Sörfler

diğer elyaf türleri ile ortak olarak kullanılır (melez KM!).

Bor takviyeli karma malzemelerin en yaygın olarak kullanıldıkları alan spor malzemeleri üretimidir. Başlangıçta karbon elyafı ile üretilen bazı ürünlerde yüksek zorlama altındaki karbon takviyenin yetersiz kaldığı bölgelerde kırılmaların görülmesi önemli bir sorun olmuştur. Örneğin golf sopalarında bazı firmalar bu sorunu kesitleri artırarak çözmüş, bazıları ise biçimi sabit tutarak karbon ve bor elyafı birlikte kullanmışlardır. Benzer durum iri balıklar için kullanılan oltalarda da vardır. Bor takviyeli karma malzemelerin kullanıldığı diğer spor malzemeleri ise şunlardır: tenis raketleri, yaylar, kayaklar ve yarış bisikleti gövdeleri (KTKM gövde 1,7 kg, BTKM gövde 1,0 kg). Spor malzemesi dışındaki diğer bazı kullanım örnekleri:

- Çok yüksek hızlı santrifuj gövdeleri (elyaf sarma),
- Tekerlekli sandalyeler (yarış amaçlı),
- Yelken direkleri (alüminyum esaslı, ekstrüzyonla).

Çizelge 6.9: Tek yönde takviyeli bor/epoksi karma malzemenin dayanım değerleri

Özellik	Oda sıcaklığı	175 C°
Çekme dayanımı (MPa), 0°	1800	1260
Çekme modülü (GPa), 0°	224	196
Çekme dayanımı (MPa), 90°	70	35
Çekme modülü (GPa), 90°	21	10
Basma dayanımı (MPa), 0°	2480	770

6.4. KEVLAR ELYAF TAKVİYELİ KARMA MALZEMELER (KevTKM)

Kevlar elyaf takviyeli karma malzemelerin en belirgin avantajı cam ve karbon elyaf takviyeli karma malzemelere oranla daha düşük yoğunlukla olmalarıdır. Daha önce verilen Çizelge 6.1., Kevlar-49 takviyeli karma malzemelerin mühendislik özelliklerini içermekte idi. Çizelge 6.10 ise tek yönde takviyeli KevTKM ile CTP ve KTKM karşılaştırmasını vermektedir.

Görüldüğü gibi KevTKM, CTP'den %34, KTKM'den ise %10 daha hafiftir. Bu hafiflik özellikle uçak sanayi gibi alanlarda önemli avantajlar sağlar. Çekme dayanımı diğer ikisinden de yüksek, çekme modülü ise camdan iyi, ancak karbondan düşüktür. Diğer özellikler yaklaşık olarak birbirine yakındır, ancak KevTKM'nin basma dayanımı CTP ve KTKM'den çok daha düşüktür. Basma zorlamaları altında gerilme - birim uzama eğrisi metallerdeki gibi yatıktır ve sünek bir davranış gösterir.

Yorulma dayanımı bakımından Kevlar takviyeli karma malzeme oldukça iyi özelliklere sahiptir ve karşılaştırma yapılırsa CTP ve alüminyum alaşımlarından yüksek, BTKM ve KTKM ile yaklaşık eşit yorulma dayanımına sahiptir.

Kevlar takviyeli karma malzemenin önemli bir üstünlüğü darbelere karşı dayanımınının diğer karma malzemelerden daha yüksek olmasıdır. Ayrıca titreşimleri sönümleme kabiliyeti de

Çizelge 6.10: Tek yönde takviyeli bazı karma malzemelerin karşılaştırılması

Elyaf	Kevlar 49	E-camı	Karbon(YM)
Yoğunluk (g/cm ³)	1,38	2,08	1,56
Çekme day., 0° (MPa)	1400	1100	1250
Basma day., 0° (MPa)	280	586	800
Çekme day., 90° (MPa)	28	34	41
Basma day., 90° (MPa)	138	138	138
Çekme ve basma modülü			
0° (GPa)	77	39	210
90° (GPa)	6	9	6

çok iyidir. Serbest titreşimleri sönümlene kabiliyeti örneğin çeliğin 8 katıdır.

Elektriksel özellikleri bakımından Kevlar mükemmel bir yalıtıcıdır, elektromanyetik dalgaları ise çok iyi geçirir (radar!). Isıl genleşme katsayısı eksi işaretlidir, yani ısındıkça kısalır. Elyafın kimyasal dayanımı çok iyidir, dolayısıyla karma malzemenin kimyasal dayanımını matrisin özellikleri belirler.

Kevlar, karbon ve cam lifler birbirinden farklı özelliklere sahip olduklarından, bunların üstün yönlerinden yararlanmak için aynı karma malzeme içinde birlikte kullanılırlar : Melez (hybrid) KM. Kevlar elyaf özellikle cam elyaf ile ortak olarak kullanıldığında iyi sonuçlar verir. Bu tür "melez" malzemelerde , Kevlar hafiflik, modül, yorulma dayanımı, darbe dayanımı, cam elyaf ise basma dayanımı bakımından katkıda bulunur.

Kullanım alanları:

Kevlar takviyeli karma malzeme en yaygın olarak uçak ve uzay sanayinde, ayrıca bunun yanında gemi ve otomotiv endüstrisi ile spor malzemeleri üretiminde kullanılmaktadır. Diğer elyaflarda olduğu gibi hafiflik, dayanım ve modül özellikleri yanında, bilhassa tokluk (darbe dayanımı), yorulma dayanımı, titreşim sönümlene kabiliyeti, boyut

kararlılığı, sürünme dayanımı ve korozyona dayanım gibi özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Tek başına kullanılmasının yanında karbon ve camla birlikte "melez" karma malzeme elde etmek için de kullanılmaktadır.

Uygulama örnekleri:

- Roket motoru gövdeleri elyaf sarma yöntemiyle KevTKM olarak üretilebilir. Örneğin C-4 denizaltı balistik nükleer füzelerinde üç kademede de roket motoru gövdesi bu karma malzemedен üretilmiştir.
- Uzay mekiğinde değişik gazların (sıvı O₂, N₂ v.s) depolandığı 17 adet basınçlı kap vardır. Bunlar iç kısımlarında bir metal gömlek bulunan Kevlar 49/epoksi karma malzemedен üretilmişlerdir.
- Uçak sanayinde değişik kanatcıkların, iniş takımı kapılarının ve benzeri yük taşıyan parçaların üretiminde uygulanmaktadır. Ayrıca iç kısımlarda da hafif olmaları nedeniyle örneğin gösterge panoları, konsollar, koltuklar v.s. gibi birçok yerde kullanılmaktadır.
- Hafiflik ve rijitlik yanında darbe dayanımlarının da çok iyi olması nedeniyle kano üretiminde tercih edilir. Ayrıca büyük gemilerden küçük teknelere kadar değişik kullanım yerleri vardır. Özellikle güç sınırlı yarış tekneleri KevTKM'den imal edilirler. Motor gücü sınırlı olan bu teknelerde hafiflik çok önemlidir ve diğer malzemelerden üretilen teknelerin KevTKM ile üretilmiş teknelerle rekabet şansı çok azdır.
- Spor malzemesi olarak KevTKM (kısmen melez olarak) tenis raketleri, oltalar, kar ve su kayakları, golf sopaları, yaylar v.b. malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır.
- Otomotif sanayinde ise bu malzemelerin yaygın olarak kullanılmasını sınırlayan faktör, seri üretime uygun imalat yöntemlerinin yeterince geliştirilmiş olmamasıdır. Üretilen parçalara örnek olarak: makas yayları, şaftlar, tampon kolları, tekerlek jantları, bazı gövde elemanları ve özellikle fren ve debriyaj balataları gösterilebilir.

6.5. METAL MATRİSLİ ELYAF TAKVİYELİ KARMA MALZEMELER

Metal matrisli karma malzemeler için ucuz, kolay ve oda sıcaklığında gerçekleştirilebilen üretim yöntemleri yeterince geliştirilemediğinden, bu malzemeler reçine matrisli karma malzemelere oranla daha az kullanılmaktadır. Ancak birçok

Çizelge 6.11: Metal Matrisli Elyaf Takviyeli Karma Malzemele-
rin Kullanım Yerlerine Örnekler (w: whisker)

Kullanım Yeri	Kullanılan Karma Malzeme
Uzay sanayi -Konstrüksiyonlar, antenler	B/Al, B/Mg, C/Mg
Uçak sanayi -Pilonlar, payandalar, kapılar, çerçeveler, döşeme kirişleri, fan ve kompresörler -Türbin kanatları	B/Al, SiC/Al, C/Al elyaf takviyeli süperalaşım in-situ kompozitler
Otomotif sanayi -Motor gövdeleri, piston kolları, yaylar	SiC ^w /Al
Elektrik endüstrisi -Elektrik motoru fırçaları -Akü plakaları -Elektrik kabloları	C/Cu Al ₂ O ₃ /Pb, C/Pb, Cam/Pb C/Cu
Tıp -Röntgen masaları, protezler, tekerlekli sandalyeler	B/Al, SiC/Al
Spor malzemesi -Tenis raketleri, kayaklar, golf sopaları, bisiklet gövdeleri	B/Al, C/Al, SiC ^w /Al
Tekstil -Mekik	B/Al, C/Al, SiC/Al
Diğer -Makina yatakları -Kimyasal gereçler	C/Pb Al ₂ O ₃ /Pb

uygulama için gerekli olan önemli üstünlüklere sahiptirler:

- Yüksek sıcaklık uygulamaları için uygundur,
- Şekillendirilebilirler,
- Birleştirilmeleri kolaydır (kaynak),
- Mekanik özellikleri daha iyidir (tokluk!),
- Bazı ortamlarda korozyona daha dayanıklıdırlar (örn. nemli)

Halen kullanılan birçok metal matrisli KM vardır. Matris olarak alüminyum ve magnezyum gibi düşük yoğunluklu metaller olduğu gibi, bakır gibi elektrik iletkenliği veya süperalaşım gibi yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle tercih edilen malzemeler de kullanılmaktadır. Çizelge 6.11. değişik alanlarda kullanılan metal matrisli karma malzemelere ait örnekleri içermektedir.

BÖLÜM 7

ÜRETİM KUSURLARI VE TAHRİBATSIZ KONTROL YÖNTEMLERİ

Mühendislikte kullanılan malzemeler arasında karma malzemeler, yapısal kusurlar ve hasar türleri bakımından en az bilgi birikiminin bulunduğu türdür. Bir uçak elemanının veya bir basınçlı kabın, metal malzemeler kullanılarak tasarımında mühendisler deneyimlerle geliştirilmiş ve uzun yıllar uygulanarak başarılı olduğu kanıtlanmış tasarım yöntemlerinden yararlanırlar. Bu yöntemler hasara neden olabilecek plastik şekil değişimi mekanizmaları, çatlak büyümesi, yorulma çatlak ilerlemesi v.b. mikroskopik olayların anlaşılması sonrasında geliştirilebilmiştir. Metal malzemelerde kırılma mekanigi ve diğer yöntemlerle bir parçanın statik ve dinamik yükler veya darbe zorlamaları ve hatta gerilme korozyonu altında ömrünün tahmin edilmesi mümkündür. Bütün bunlara rağmen, hala tasarım hataları olmaktadır; ancak bu hasarlar genellikle bilinen bazı metalurjik, geometrik veya ortamla ilgili faktörlerin tasarımcı tarafından gözden kaçırılması sonucu ortaya çıkmaktadır.

Kompozitlerde ise mevcut bilgi birikimi ve tasarım yöntemlerinin gelişme düzeyi yeterli değildir. Karma malzemelerin davranışı hakkında yeterli deneyimimiz yoktur; uzun süreli yük ve ortam etkilerinin sonuçları tam olarak bilinmemektedir. Ayrıca hasarın mikroyapısal mekanizmaları hakkındaki araştırmalarımız da yeterli değildir. Bunun yanında karma malzemelerde yapıların heterojen oluşu ve uygulanan üretim yöntemlerinin tabiatı gereği, üretim

kusurlarının ortaya çıkmasını tümüyle engellemek mümkün olmamaktadır. Bu durum doğal olarak günümüzde uygulanan tasarımlara da yansımaktadır, örneğin kritik uygulama yerlerinde CTP malzemedeki seçilen emniyet katsayıları 20'ye kadar çıkabilmektedir. Böylece karma malzemelerin hafiflik avantajı ortadan kalkmakta, ekonomik dezavantajı ise giderek büyümektedir.

7.1. ÜRETİM KUSURLARI

Karma malzemeler üretimden kaynaklanan bazı kusurlar içerebilirler. Koşullar ne kadar sıkı kontrol edilirse edilsin karma malzemeler özellikleri bakımından en çok sapma gösteren malzemeler arasındadır. Bu sapsmalar seri ve otomatik üretim tekniklerinde daha düşük, el yatırması gibi yöntemlerde ise daha yüksektir.

Elyaf takviyeli karma malzemelerde rastlanan hataların bazıları şunlardır:

- Ortalama elyaf hacim oranının düşük olması,
- Yanlış yerleştirilmiş veya kırılmış elyaf,
- Liflerin homojen dağılması ve matrisce zengin bölgelerin varlığı,
- Bazı bölgelerde elyafın matris tarafından ıslatılmamış olması,
- Delaminasyonlar,
- Tabakaların istiflenmesindeki hatalar,
- Reçinenin katılaşması sırasında oluşan kusurlar,
- Üretim sonunda soğuma sırasında oluşan reçine çatlakları.

Bütün bu kusurlar buldukları bölgelerde malzemenin dayanımını düşürürler ve zorlamalar altında büyürler. Bu bölgeler örneğin bir yorulma çatlakının başlangıcını oluşturabilirler. Bu nedenlerle karma malzemelerden üretilen parçaların kullanıma alınmadan önce kalite kontrolüne özen gösterilmesi büyük önem taşımaktadır. Ayrıca gerek kontrol

sırasında (örneğin basınç testinde), gerekse işletme sırasında hasarlar oluşabileceğinden bu kontrolların periyodik olarak tekrarlanması gerekir.

7.2. TAHRİBATSIZ KONTROL YÖNTEMLERİ

Gözle Kontrol

Gözle kontrol en çok kullanılan yöntem olup, bu kontrol yardımıyla renk değişimleri (reçinenin katılaşmasında aşırı ısınan bölgeler), yabancı maddeler, çizikler, matris çatlakları, gözenekler, yüzey hataları, reçine bakımından zengin olan bölgeler, delaminasyonlar gibi kusurlar saptanabilir. Gözenekler, ıslatma kusurları, delaminasyon ve iri kalıntılar saydam karma malzemelerde ışık geçirilerek kontrol edilir. Bilindiği gibi CTP'de elyaf-reçine bağının kopması ve reçine çatlakları saydamlığın kaybolmasına yol açmakta ve bu olay görünüşü nedeniyle "gerilme beyazlığı" olarak adlandırılmaktadır. Saydam olmayan karma malzemelerde ise yoğun ışık altında yapılan gözle kontrolle sadece yüzeydeki kusurlar saptanabilir.

Gözle kontrolde çok küçük yüzey hatalarınının da saptanabilmesi için bazı tekniklerden yararlanılabilir:

- Diğer malzemeler için de kullanılan penetran yöntemleri uygulanabilir.
- Kritik parçalar ve hasara duyarlı olduğu bilinen bölgeler ile özellikle yorulma çatlakları için Moire tekniği uygundur. Karma malzemenin yüzeyine fotografik yöntemlerle bir kafes çizilir. Gönderilen tek dalga boylu ışık altında oluşan girişim saçakları yerel gerilme yığılmalarını ve şekil değişimlerini gösterir.

Ultrasonik Yöntemler

Ultrasonik yöntemler de kompozitlerin tahribatsız muayenesi için en sık kullanılan yöntemler arasındadır. Bu iş için genellikle özel cihazların kullanılması gerekir; normal ultrasonik cihazların karma malzemeler için kullanılmaları

halinde örneğin yüzey saçılmasının yüksek olması nedeniyle güçlükler doğabilir.

Bir ultrasonik dalga, malzeme içinde bir arayüze veya süreksizliğe rastlarsa enerjinin bir kısmı geri yansır. Geçen enerji ise saçılabilir ve parça kalınlığına bağlı olarak kısmen malzeme tarafından absorbe olur. Ultrasonik yöntemlerde prensip olarak yansıyan ve geçen dalga enerjilerindeki değişimler yardımıyla ultrasonik dalganın yolu üzerindeki kusur, yani süreksizliklerin saptanmasına çalışılır.

Pratikte bu iki yöntemin her ikisi de ultrasonik dalgaya dik ve yeterince büyük süreksizliklerin saptanmasında kullanılabilir. Yansıma yöntemiyle çok küçük delaminasyon ve boşlukların, reçinenin eksik olduğu bölgelerin ve gözeneklerin saptanması güç olduğundan, bu durumlarda geçen dalga yöntemi daha iyi sonuç vermektedir.

Karmaşık biçimli parçalarda açılı dalga gönderilir. Malzeme içinde kusur bulunmaması halinde dalga cidarlarda yansıyarak bir süre sonra şiddetini kaybeder. Geri yansımanın görülmesi ise bir kusurun varlığına işarettir.

Kusurların saptanması yanında, ultrasonik yöntemler kalınlık ölçümünde de kullanılır. İnce parçalarda geçen dalga, kalın parçalarda ise darbe-yankı yöntemi tercih edilir. Ölçüm hassasiyeti olarak % 2'ye ulaşılabilir.

Ultrasonik yöntemin bir diğer uygulaması da öztitreşim ölçümleridir. Malzeme ve geometriye bağlı olan öztitreşim frekansı saptandıktan sonra, bu değer zamanla değişmesi durumunda hataların oluştuğu anlaşılabilir.

Bilindiği gibi dalga hızı ile elastiklik modülü arasında $v = \sqrt{E/\rho}$ bağıntısı vardır. Bu bağıntı anizotropik malzemeler için $v_{13} = \sqrt{C_{13}/\rho}$ şeklinde yazılabilir. Yani dalga hızı elastiklik modülü yani takviye miktarı ve şekli ile değişmektedir. Dolayısıyla karma malzemelerde dalga hızı ölçümleri takviyenin homojen olarak dağılıp dağılmadığının kontrolünde kullanılabilir.

Isıl Teknikler

Bu yöntemde malzemede hataların varlığı nedeniyle oluşan ısı akışı değişimlerinden yararlanılır. Parçanın ısınması ve soğuması sırasında yüzey sıcaklıkları, duyarlı infrared ölçüm cihazları ile saptanır veya infrared fotoğraflar çekilir. Malzemede yüzeye yakın bir kusurun bulunması durumunda ısı akışı engelleneceğinden hata bölgesindeki sıcaklık daha yüksek olur.

Diğer bir teknik de sıvı kristallerin sıcaklığa bağlı olarak renk değiştirmelerinden yararlanmaktır. Burada yüzey ince bir tabaka sıvı kristal ile kaplanır ve ısıtma sırasındaki renk değişimleri gözlenir.

Isıl tekniklerle yüzeye yakın büyük boşluklar, delaminasyonlar ve büyük süreksizlikler saptanabilir.

Dinamik Analiz Yöntemleri

Bilindiği gibi malzemelerin elastik davranışları kusur içeren bölgelerinde farklı olacaktır. Tahribatsız kontrollerde elastiklik modülünden daha çok sönümlenme özelliğinin değişiminden yararlanılır. Örneğin sağlam bir metal parçaya vurulduğunda tiz bir çınlama duyulurken, aynı parçanın çatlak içermesi halinde tok bir ses çıkar. Yani çıkan karakteristik sesin dinlenmesi ile, basit olarak bir frekans spektrumu analizi yapılmış olur. Benzer şekilde karma malzemelerde "para vurma" tekniği uygulanır: kusurun bulunduğu bölgelerde ses değişir. Bu yöntem pratiktir ancak zaman alıcıdır ve çok küçük kusurların saptanması için uygun değildir.

Aynı prensibe dayanarak geliştirilmiş bir diğer teknik de parça kullanıma alınmadan önce, belirli nokta veya noktalardan titreşimler vermek ve bunları kaydetmektir. Parça bir süre kullanıldıktan sonra yapılacak periyodik kontrollerde aynı titreşimler uygulanarak karşılaştırma yapılır. Çok hızlı ve pratik olan bu yöntemde bir kusurun varlığı anlaşıldıktan sonra, konumunu belirlemek için teorik ve deneysel incelemelere geçilir.

Akustik Emisyon

Karma malzeme içinde oluşan herhangi bir yapısal değişim (örneğin matris çatlakları, lif kopması gibi) bir elastik enerjinin boşalmasına ve bu kaynaktan elastik dalgaların yayılmasına neden olur. Bu dalgaların sayısı ve şiddetinin saptanması esasına dayanan akustik emisyon tekniğinde, parçanın değişik bölgelerine yerleştirilen algılayıcılarla saptanan dalgalar değerlendirilerek hasarın konumu ve önemi hakkında bilgi edinilir. Cihazlar genellikle belirli bir süre içinde oluşan hasar olaylarının sayısını ve şiddetini saptarlar ve sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilir. Bu yöntem, karma malzeme içindeki hasar oluşum mekanizmalarının araştırıldığı çalışmalarda da kullanılabilir.

Günümüzde bu yöntem kompozit yapıların endüstriyel kabul kriterleri arasına girmeye başlamıştır. Örneğin ETKM depoların kabul şartnamelerinde aşağıdakilere benzer maddeler yer almaktadır:

Belirli bir zorlama altında :

- Toplam akustik emisyon sayısı 5000'i geçmeyecektir.
- 70 dB üzerindeki (lif kopması) emisyon en çok 10 olacaktır.
- Sabit yükte beklemede ilk 2 dakikada hasar oluşmayacaktır.

Yukarıda en önemlileri sıralanan tahribatsız muayene yöntemleri dışında karma malzemelerde mikrodalga, ışınlama (X-ışını) gibi birçok yöntemden yararlanılır.

Yararlanılan Kaynakları:

1. J.R.Vinson ve T-W.Chou,
COMPOSITE MATERIALS AND THEIR USE IN STRUCTURES,
Applied Science Publishers Ltd., London 1975.
2. PRACTICAL CONSIDERATIONS OF DESIGN, FABRICATION AND
TESTS FOR COMPOSITE MATERIALS
NATO - AGARD Lecture Series No.124, Oct. 1982, Ankara.
3. COMMERCIAL OPPURTUNITIES FOR ADVANCED COMPOSITES
ASTM, Special Technical Publication, Philadelphia 1980.
4. R.M.Jones
MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS
McGraw-Hill Book Company, NewYork 1975.
5. R.L.King
PRODUCTION ENGINEERS VIEW OF ADVANCED COMPOSITE MATERIALS
Materials and Design-Vol.3, 1982, s.515 ve s.580 (2 bölüm)
6. L.J.Broutman ve R.H.Krock
MODERN COMPOSITE MATERIALS
Addison-Wesley Publishing Comp., Reading 1967.
7. HANDBOOK OF FIBERGLASS AND ADVANCED PLASTIC COMPOSITES
G.Lubin (editor), R.E.Kruger Publ., Huntington N.Y., 1975.
8. D.K.Rider
FIBER AND STRESS-SKIN COMPOSITES
J. of Materials Education Vol.6, 1984, s.261.
9. J.M.Whitney, I.M.Daniel ve R.B. Pipes
EXPERIMENTAL MECHANICS OF FIBER REINFORCED COMPOSITES
Soc.for Exp. Stress Analysis, Connecticut 1982.
- 10.CTP TEKNOLOJİSİ
Can Elyaf Sanayi AŞ, istanbul 1985.
- 11.J.E.Ashton, J.C.Halfin ve P.H.Petit
PRIMER ON COMPOSITE MATERIALS : ANALYSIS
Technomic Publication, Connecticut 1969.
- 12.B.C.Hoskin ve A.A.Baker
COMPOSITE MATERIALS FOR AIRCRAFT STRUCTURES
AIAA Education Series, Broadway, NewYork.
- 13.S.W.Tsai
INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIALS
Technomic Publ. 1980, Lanchaster.
- 14.M.M.Schwartz
COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK
McGraw-Hill Book Company, New York 1984.