

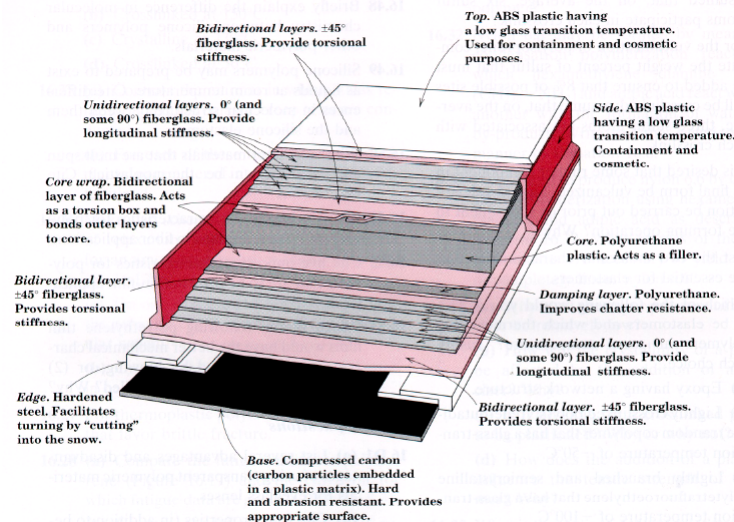
3. Materials struktur 3.9 Kompositers struktur

[Callister 16]

Vad är kompositmaterial?

- Ett material som kombinerar material av olika komposition eller form **på en makroskala** för att åstadkomma specifika egenskaper
 - Makro är i praktiken från storleksordningen mikrometer uppåt
- Denna definition kan givetvis generaliseras till en nanoskala: **nanokomposit**
- Grundidén kan sammanfattas som "**principen för kombinerad verkan**": komposit är multifas-material som har som helhet en kombination av delfasernas egenskaper så att en fördelaktig kombination av egenskaper erhålls.
 - Naturligtvis är det också möjligt att göra komposit med sämre totala egenskaper, men de är inte av större praktiskt intresse...

Exempel: en modern slalomskida – en mycket avancerad komposit



Naturliga och artificiella komposit

- Många material har inherent i sig olika faser:
 - T.ex. så kallade perlit-stål har en blandning av ferrit och cementit:
 - ferrit är mjuk och formbar
 - cementit är hård och skör
 - Hela perlit-stålet är formbar och stark => bra kombinerad verkan
 - Likaså är t.ex. träd och ben komposit (jfr. förra kapitlet)
- Men i detta stycke koncentrerar vi oss på **konstgjorda komposit**, som definieras som:
 - En som inte formas av sig själv
 - Som har kemiskt eller atom-strukturellt distinkta faser som skiljs åt av en väldefinierad gränssyta.

Matris och dispers fas

- Ofta består kompositer av två faser: en kontinuerlig som omger helt en annan som är i diskreta objekt åtskiljda från varann
 - Den förra kallas **matris** ("matrix") den senare **dispers** fas
- Den dispersa faser kan vara i många olika rymdkonfigurationer:
 - a) koncentration
 - b) storlek
 - c) form
 - d) distribution
 - e) orientation

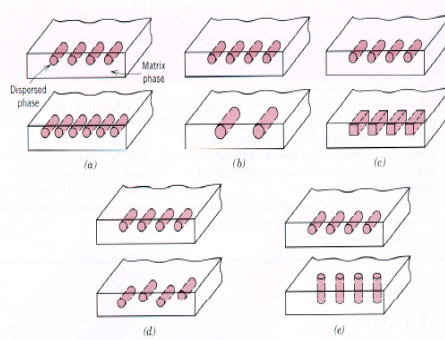


FIGURE 17.1 Schematic representations of the various geometrical and spatial characteristics of particles of the dispersed phase that may influence the properties of composites: (a) concentration, (b) size, (c) shape, (d) distribution, and (e) orientation. (From Richard A. Flinn and Paul K. Trojan, *Engineering Materials and Their Applications*, 4th edition, Copyright © 1990 by John Wiley & Sons, Inc. Adapted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

5

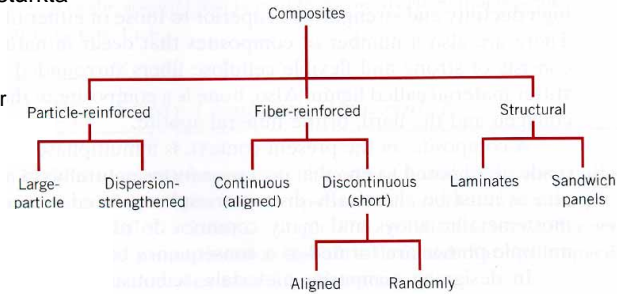
Klassificering av kompositer

- Kompositer kan klassificeras efter hur de är förstärkta

- Förstärkningen kan vara med :
 - 0D: partiklar
 - 1D: fibrer
 - 2D: laminat

- Skillnaden mellan stor-partikel och dispersions-förstärkningmekanismen:

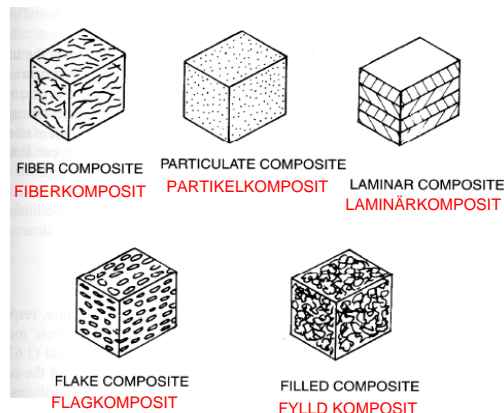
- stor-partikel: makroskopisk överföring av spänning till partiklarna
- dispersion: mikroskopisk, partiklarna förstärker materialet på molekylärnivå (hindrar dislokationsrörelse och "crack propagation")



6

Klassificering av kompositer

- Här är exempel på några typer:
- Fiber definieras i detta sammanhang som ett objekt längre än 100 µm med ett aspekt-förhållande (= längd/bredd) > 10:1



7

3.9.1. Partikelkompositer

- Partikelkompositer är förstärkta med diskret åtskiljda partiklar
- De kan underklassificeras till
 - Storpartikelkompositer
 - Dispersionsförstärkta kompositer
- Skillnaden ligger i på vilket sätt förstärkningen åstadkoms
- Storpartikelkompositer:
 - Partiklarna är så stora att de kan behandlas med kontinuum-mekanik: dynamiska atomära växelverkingarna vid gränssnittet spelar ingen roll för kompositens makroskopiska mekaniska egenskaper
 - Stark (statistisk) bindning mellan matris&partikel krävs
 - Typiskt är partiklarna något som är hårdare än matrisen
 - Partiklarna tar över en del av den mekaniska hårdheten

8



Partikelkompositer

- Dispersionsförstärkta kompositer:
 - Partiklarna är mindre, typiskt 10-100 nm
 - De förstärkar materialet genom att stoppa rörliga dislokationer i materialet
 - Dislokationerna är huvudorsaken till plastisk deformation i materialet



Partikelkompositers styrka

- Kompositers egenskaper är i allmänhet en kombination av delarnas egenskaper
- I det enklaste tänkbara fallet är kompositens egenskaper helt enkelt summan av delfasernas egenskaper (givetvis vägd med mängden)
- För storpartikelkompositer säger den så kallade blandningsregeln ("rule of mixtures") att den elastiska modulen (ett mått på hårdhet) för kompositen E_c är nånastans mellan

$$E_c(u) = E_m V_m + E_p V_p$$

och

$$E_c(l) = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m}$$

Här står c för komposit, m för matris, p för partikel, E för elastisk modul och V för volymfraktion av ämnet



Partikelkompositers styrka

- Exempel: förutspådda övre och nedre gränser samt uppmätta värden för W-partiklar i Cu

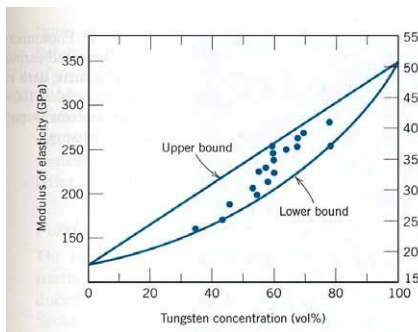


FIGURE 16.3 Modulus of elasticity versus volume percent tungsten for a composite of tungsten particles dispersed within a copper matrix. Upper and lower bounds are according to Equations 16.1 and 16.2; experimental data points are included. (From R. H. Krock, *ASTM Proceedings*, Vol. 63, 1963. Copyright ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103. Reprinted with permission.)



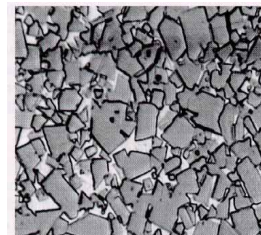
Kermeter

- Storpartikelkompositer kan tillverkas som kombination av alla tre huvudmaterialtyper (metaller, polymerer och keramer)
- Kermeter ("cermets") är kombinationer av keramer och metaller
 - Ett vanligt exempel av dessa är cementerad karbid, som består av mycket hårda keramiska partiklar som är inbundna i metallmatriser

- Keramiska partiklarna: t.ex. WC, TiC
- Metallen: t.ex. Co, Ni
- Bilden visar WC-Co

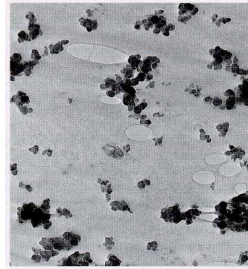
- Kermeter används ofta som ytbeläggning i skärningsverktyg:

- Keramen ger hårda skärningsytan, men är skör: metallen styrker dem så att de inte går sönder



Plast-partikelkompositer

- Både gummin och plaster förstärks ofta med partiklar
- Vanliga gummin innehåller ofta så kallad **kolsvart (kimrök)** ("carbon black")
 - Kolsvart är mycket små, nästan sfäriska partiklar av amorft kol som bildas om man bränner olja i en atmosfär med bara litet luft
 - "Traditionellt nanomaterial", mycket billigt
 - En form av sot men med mycket små partiklar => hög yt-till-volymförhållande
 - Relativt hårda partiklar (amorft kol har en viss andel sp^3 -bindningar som är samma som i diamant)
- Kolsvart förstärker vulkaniserande gummins s.g.s alla mekaniska egenskaper
 - Vanliga bilhjul innehåller ung. 15-30 volym-% kolsvart



Gummi förstärkt med kolsvart, x80000. Hålena är luftbubblor

Betong och cement

- Betong är en kompositer där båda delarna är keramer
- Cement är själva bindningsmaterialet
 - Material som när de blandas med vatten formar en enhetlig pasta som härdas av sig själv
- Betong är ett material där ett partikelsystem binds ihop i fast form av ett bindningsmaterial, cementet
- Asfalt i vägar är (i denna definition) en typ av betong, som egentligen borde kallas asfaltbetong
 - Själva bindningsmassan är asfalten, som är ett material som består mest av bitumen, som är den tyngsta delen av råolja
 - Alltså en kolväteförening
 - Asfalten har tydligen i sig en kolloidstruktur
 - Asfaltbetong är en blandning av asfalt och grus

Portlandcement-betong

- Den vanligaste typen av cement är så kallad portland-cement
 - Den produceras med att blanda lera och bränd kalk, hetta upp och blanda in lite gips. Slutresultatet består av flera olika föreningar, av vilka de viktigaste är tricalcium-silikat $3CaO \cdot SiO_2$ och dicalcium-silikat $2CaO \cdot SiO_2$
- Portlandcement-betong är en blandning av portlandcement, fin sand, grov sand (grus), och vatten
 - Sanden och grusen har den viktiga funktionen att reducera materialets pris: sand och grus är relativt billigt jämfört med cement.
 - Orsaken att man blandar både fin och grov sand är att på det sättet kan man försäkra sig om tät packning av materialet
- Rent portlandcement-betong är ett skört material, och uppvisar stor temperaturutvidgning
 - För att lösa detta måste man lägga till förstärkning och tilläggsämnen

Förstärkt betong

- Betong förstärks i allmänhet genom att lägga till stål till det
- Stålet kan vara i form av stavar, tråd, balkar, eller nät, som sätts in i materialet då betongen härdas
- Förstärkningen gör att även om sprickor bildas i den sköra betongen, sprids de inte då de stoppas av förstärkningen
 - En vitsig detalj är att förstärkningsstålet i själva verket gärna får vara lite rostig, för rosten ökar på ytarean och binds bra till själva betongen
- Stål lämpar sig bra för ändamålet för att det har ganska exakt samma värmeutvidgningskoefficient som betong
- Betong kan också förstärkas med andra material som fibrer av glas, nylon, eller polyetylen





Förspänd betong

- Ett annat sätt att förstärka betong är att avsiktligt behandla det så att det blir kvar kompressiv spänning i det under tillverkningen. Ett sådant material kallas förspänd betong ("prestressed concrete")
- Detta fungerar för att sköra keramer är hårdare under kompressiv spänning än under tånjning
- För att söndra betongen med tånjning, måste tånjningstrycket vara större än förspänningen inne i materialet
- Förspänd betong kan tillverkas t.ex. genom att hålla betong på ståltrådar som är uttånjda.
 - Betongen får härdas, men efter att den gjort det, släpps spänningen i ståltrådarna
 - Dessa krymper ihop, men orsakar samtidigt kompressiv spänning i betongen!



Hela faderullan...

- För att sammanfatta, alltså är förspänd betong:
 - Ett material under spänning
 - Materialet är en metall-keram-komposit
 - Keram-kompositen (betong) är en keram-keram-komposit med tre komponenter: cement, fin sand och grov sand
 - Cementen i sig är en blandning av olika kemikalier



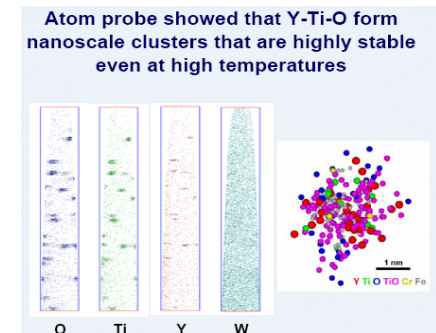
Dispersionsförstärkta kompositer

- Dispersions-förstärkta kompositer är metaller som förstärks genom att blanda in flera volym-% av mycket små partiklar av ett hårt och kemiskt stabilt material
 - De små partiklarna kan vara metalliska eller ickemetalliska; ofta är de oxider
 - Förstärkningen hänger ihop med dislokationer: metallers mekaniska egenskaper domineras helt av dessa (mer om detta senare under kursen)
 - Oxid-partiklarna stannar upp dislokationerna och hindrar på det sättet materialet att flyta



Dispersionsförstärkta kompositer

- Exempel: "ODS steels": oxid-dispersions-förstärkta stål:
 - Stål med Y-Ti-O-partiklar på nanoskala
- Krypningraten av dessa stål vid höga temperaturer rapporterades vara 6 storleksordningar mindre än vanlig stål



3.9.2. Fiber-förstärkta komposit

- Vid utvecklingen av fiberkomposit strävar man efter att åstadkomma material med hög styrka och hög elasticitetsmodul jämfört med deras vikt
 - Dessa beskrivs i allmänhet som specifik styrka och specifik modul, vilka är förhållandet mellan materialets tånjstyrka och elastiska modul jämfört med dess densitet
- Om en spänning läggs på materialet, förflyttas den först till matrisen och sedan delvis till fibrerna. Om dessa är starkare än matrisen, förstärks den

Historiska fiberkomposit

- Det första kända kompositmaterialet är tegel som förstärktes med halm
 - T.ex. rapporteras det i litteraturen om att Egyptens härskare tvingade israeliterna att skaffa halm själv för att tillverka tegel

[II. Moseboken 5]:

7att inte längre dela ut halm till israeliterna när de skulle slå tegel. "De får själva skaffa halm", sade han, 14 Och de israelitiska förmännen, som faraos fogdar hade satt över dem, blev pryglade. "Varför har ni inte tillverkat lika mycket tegel som förut, varken i går eller i dag?" sade man. 15Da gick förmännen och klagade inför farao: "Varför gör du så mot dina tjänare? 16Ingen halm ger man oss, men vi får ändå order att göra tegel. Nu får vi ta emot hugg och slag, och skulden är din." ...

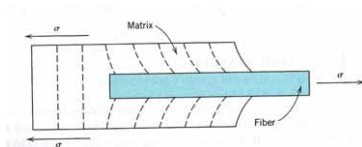


Egyptian brick-making is depicted in this wall painting from the tomb of Egyptian necromancer Nebamun from the mid-second millennium B.C. The painting shows workmen gathering reeds, cutting reeds, and carrying the reeds to the brickworks after drying.

[<http://www.gnmagazine.org/issues/gn09/gn97ma.pdf>]

Inverkan av fiberns längd

- Centralt för hur bra fibrerna kan förstärka materialet är också hur mycket av en spänning i matrisen kan förflyttas till fibern
- Betrakta följande bild som visar en enskild fiber under skjuvning (matrisen dras åt ena hållet och fibern åt det andra):



- I ändan av fiber sker ingen överföring av spänning till matrisen, utan överföringen ökar med fiberns längd
 - För att åstadkomma effektiv överföring av spänning till fibrerna krävs någon kritisk längd för fibern

Inverkan av fiberns längd

- Den kritiska längden är

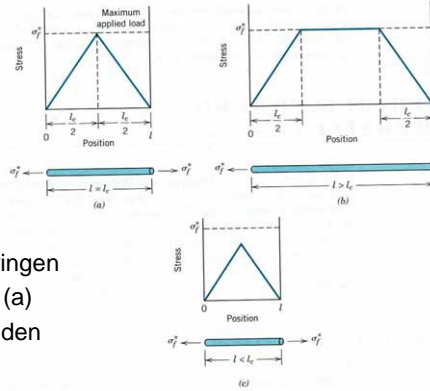
$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c}$$

där σ_f^* är fiberns tånjstyrka, d dess diameter och τ_c styrkan av fiber-matris-gränssnittet

- För typiska glas- och kolfiberkomponenter är denna kritiska längd av storleksordningen 1 mm, 20-150 gånger fiberns diameter

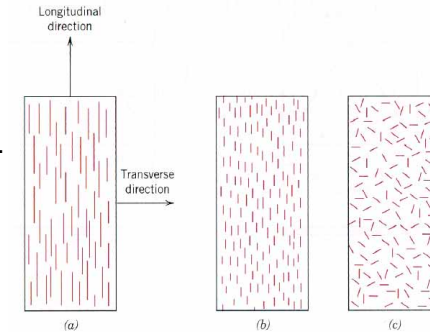
Inverkan av fiberns längd

- Under den kritiska längden erhålls inte den maximala möjliga överföringen av spänning någonstans (c i bilden)
- Vid den kritiska längden erhålls den maximala överföringen av spänning i exakt en punkt (a)
- För fibrer längre än l_c erhålls den vid en längre väg
- Fibrer med en längd $l \gg l_c$ kallas **kontinuerliga** fibrer
- De övriga kallas **diskontinuerliga** eller **korta**; i dessa får man ingen nyttig fiberförstärkning, utan de fungerar som partikelförstärkta komposit



Inverkan av fiberns orientation och densitet

- Det finns flera olika möjligheter för hur fibrerna kan vara arrangerade i matrisen, t.ex.
 - a) kontinuerligt och ordnat
 - b) diskontinuerlig och ordnat
 - c) diskontinuerligt och helt ordnat
- Dessa kan ännu generaliseras till 2 dimensioner: t.ex. kan fibrerna ligga alla i samma z-plan och vara riktade i x- eller y-led
- Om ett material utsätts för tånjning i en vis riktning, är det givetvis fördelaktigast om det har fibrer ordnade i denna riktning



Fibers egenskaper, whiskers

- En av nycklarna till fiberkompositers goda fördelar är att en fiber av ett material kan vara starkare än det makroskopiska materialet!
 - Detta kan lätt förstås som så, att det är mycket osannolikt att fibermaterialet skulle ha mikro- eller makroskopiska defekter som kan leda till att den börjar sönderfalla vid dem
- Fibrerna kan delas i whiskers ("whiskers", bokstavligen översatt morrhår), fibrer och trådar
- Whiskers** är mycket tunna enhetskristaller som har höga **aspektförhållanden** (=längd/diameter)
- Tack vare att de är små, kan de vara kristallografiskt nästan perfekta och därmed mycket hårda
 - De är utmärkta i princip, men dyra, och används därför inte brett
- Exempel:
 - grafit, kolnanorör, kiselkarbid, kiselnitrid mm

Fibrer

- Fibrer klassificeras som långa material som är antingen mångkristallina eller amorfa och har liten diameter
 - Polymer-aramider, glas, kol, bor, oxider, karbider
- Trådar är sedan sådana med mer eller mindre makroskopiska mått
 - Typiskt hårda metaller: stål, molybden, wolfram
 - T.ex. bilringar förstärks ofta med ståltrådar

Exempel på fibermaterials styrkor

Table 17.4 Characteristics of Several Fiber-Reinforcement Materials

Material	Specific Gravity	Tensile Strength [GPa (10^6 psi)]	Specific Strength (GPa)	Modulus of Elasticity [GPa (10^6 psi)]	Specific Modulus (GPa)
<i>Whiskers</i>					
Graphite	2.2	20 (3)	9.1	700 (100)	318
Silicon nitride	3.2	5–7 (0.75–1.0)	1.56–2.2	350–380 (50–55)	109–118
Aluminum oxide	4.0	10–20 (1–3)	2.5–5.0	700–1500 (100–220)	175–375
Silicon carbide	3.2	20 (3)	6.25	480 (70)	150
Kolnanorör [A. Kuronen Nano II]	~0.5	18 – 68	36 - 136	270 – 470	540 - 940
<i>Fibers</i>					
Aluminum oxide	3.95	1.38 (0.2)	0.35	379 (55)	96
Aramid (Kevlar 49)	1.44	3.6–4.1 (0.575–0.600)	2.5–2.85	131 (19)	91
Carbon*	1.78–2.15	1.5–4.8 (0.22–0.70)	0.70–2.70	228–724 (32–100)	106–407
E-Glass	2.58	3.45 (0.5)	1.34	72.5 (10.5)	28.1
Boron	2.57	3.6 (0.52)	1.40	400 (60)	156
Silicon carbide	3.0	3.9 (0.57)	1.30	400 (60)	133
UHMWPE (Spectra 900)	0.97	2.6 (0.38)	2.68	117 (17)	121

Materialfysik 2010 – Kai Nordlund

29

Exempel på fibermaterials styrkor

Table 17.4 Characteristics of Several Fiber-Reinforcement Materials

Material	Specific Gravity	Tensile Strength [GPa (10^6 psi)]	Specific Strength (GPa)	Modulus of Elasticity [GPa (10^6 psi)]	Specific Modulus (GPa)
<i>Metallic Wires</i>					
High-strength steel	7.9	2.39 (0.35)	0.30	210 (30)	26.6
Molybdenum	10.2	2.2 (0.32)	0.22	324 (47)	31.8
Tungsten	19.3	2.89 (0.42)	0.15	407 (59)	21.1

Materialfysik 2010 – Kai Nordlund

30

Matrisfasen

- Matrisfasen kan vara vad som helst
- Men för mekaniska tillämpningar används i allmänhet metaller eller polymerer för att dessa inte är sköra
- För fiberkompositer har matrisfasen flera olika roller
 - Den binder fibrerna ihop
 - Den förmedlar den externa spänningen till fibrerna; bara en mycket liten del av spänningen uppbärs av matrisen
 - Den skyddar fibrerna från omgivningen, t.ex. mekaniska skador eller kemiska reaktioner
 - Den hindrar sprickor från att förflyttas direkt från en fiber till en annan
- Matrisen och fibern måste vara tillräckligt starkt bundna till varann att fibrerna helt enkelt inte dras ut ur materialet

Materialfysik 2010 – Kai Nordlund

31

Polymer-matris-kompositer

- Polymer-matris-kompositer består av en polymer-harts som matris och fibrer som förstärker den
 - Med harts avses här en tung-molekylviktts plast-material som kan härdas
- De är mycket vanliga material tack vare att de är relativt förmånliga att tillverka och har bra egenskaper
- En viktigt klass av dem är **glasfiber-förstärkta polymerkompositer** ("glass fiber-reinforced polymer composites", GFRP)
- Glas är populärt i kompositer för att den lätt kan dras ut till långa trådar från den smultna fasen
 - Glas är ganska starkt, och då den innesluts i en plastmatris ger den mycket hårda kompositer
 - Glas är kemiskt mycket stabilt

Materialfysik 2010 – Kai Nordlund

32



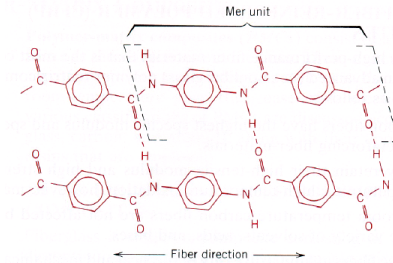
Kolfiberkompositer

- Med kolfibrer avses i detta sammanhang en mångkristallin blandning av grafit och amorft kol
 - Alltså inte enkristallina grafitwhiskers eller nanorör
- Kolfiberkompositer har följande fördelar jämfört med glasfiberdito:
 - Kolfibrer har de bästa specifika mekaniska egenskaperna
 - De är termiskt mycket stabila (hög kokpunkt, mekaniska egenskaperna försämras inte vid hög T)
 - De försämras inte av fuktighet eller vanligalösningsmedel
- De kan också tillverkas relativt billigt och har därmed blivit relativt vanligt använda



Aramidfibrer, Kevlar

- Kevlar är ett kommersiellt namn för **aramidfibrer**
- De är raka, styva, långa kolvätekedjor med bensen i, som binds ihop med varandra med vätebindningar
- Dessa har bra mekaniska egenskaper i längdriktningen och har därmed blivit populära
- De används ofta med polymermatriser som epoxy eller polyester: ett polymerpolymerkompositmaterial
- De kan behandlas som textil, och har därmed blivit populära t.ex. i skottsäkra västar.



Jämförelse av glas, kol och aramid

Table 17.5 Properties of Continuous and Aligned Glass-, Carbon-, and Aramid-fiber Reinforced Epoxy-matrix Composites in Longitudinal and Transverse Directions. In All Cases the Fiber Volume Fraction is 0.60

Property	Glass (E-glass)	Carbon (High Strength)	Aramid (Kevlar 49)
Specific gravity	2.1	1.6	1.4
Tensile modulus			
Longitudinal [GPa (10 ⁶ psi)]	45 (6.5)	145 (21)	76 (11)
Transverse [GPa (10 ⁶ psi)]	12 (1.8)	10 (1.5)	5.5 (0.8)
Tensile strength			
Longitudinal [MPa (ksi)]	1020 (150)	1240 (180)	1380 (200)
Transverse [MPa (ksi)]	40 (5.8)	41 (6)	30 (4.3)
Ultimate tensile strain			
Longitudinal	2.3	0.9	1.8
Transverse	0.4	0.4	0.5



Andra fibermaterial

- De ovannämnda tre är de dominerande fibermaterialen i polymerkompositer
- Utöver dessa används i mindre skala bl.a:
 - bor, kiselkarbid, aluminiumoxid
- Helt nya fibermaterial är de som baserar sig på kolnanorör, som just börjar komma på marknaden
 - T.om. i Finland: Berner Oy tillverkar ett bobollsträd med kolnanorör i
 - Nanorören aktiveras kemiskt med epoxy-liknande material som möjliggör stark bindning till polymeren runtomkring





Metallmatrix-kompositer

- Formbara metaller har per definition egenskapen att de är smidiga vid höga temperaturer
 - Detta är inte bra i högtemperaturlämpningar
- De kan i vissa fall fås att vara hårdare vid höga temperaturer genom att blanda i dem fibrer av något material som behåller sin styrka vid höga temperaturer
- Fiberna är liknande som de som används i polymerer, och kan också vara whiskers
 - Både kontinuerliga och diskontinuerliga kan användas
- Andelen fibrer är ofta relativt hög:

Table 17.6 Properties of Several Metal-Matrix Composites Reinforced with Continuous and Aligned Fibers

Fiber	Matrix	Fiber Content (vol%)	Density (g/cm ³)	Longitudinal Tensile Modulus (GPa)	Longitudinal Tensile Strength (MPa)
Carbon	6061 Al	41	2.44	320	620
Boron	6061 Al	48	—	207	1515
SiC	6061 Al	50	2.93	230	1480
Alumina	380.0 Al	24	—	120	340
Carbon	AZ31 Mg	38	1.83	300	510
Borsic	Ti	45	3.68	220	1270



Metallmatrix-kompositer

- Metallmatrixkompositer används ofta i mycket krävande högtemperaturlämpningar:
 - Aluminimlegeringar som förstärks med aluminiumoxid och kolfibrer används i bilmotorer: dessa material är lätta men ändå termiskt stabila
 - Aluminimlegeringar som förstärks med grafitfibrer används i Hubble-rymdteleskopet



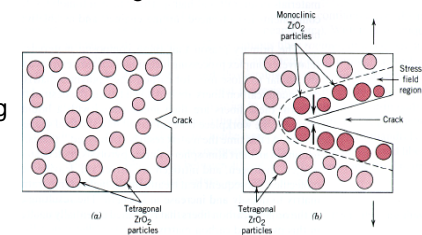
Kerammatrix-kompositer

- Keram är per definition sköra, men har andra bra egenskaper som t.ex. högtemperaturstabilitet
- För att försöka förhindra skörheten, har man utvecklat keramkompositer där en keram är inblandad i en annan i partikel, fiber eller whisker-form
- Orsaken till att ett material är skört är grovt sagt att om en spricka uppstår i den, kan den växa sig till makroskopiska mått utan hinder
- Iden är att partiklarna eller fibrerna stoppar sprickans framfart



Transformationsförstärkning

- Ett speciellt intressant sätt att bilda kerammatrixkompositer som kan hindra framfart av sprickor är så kallad transformationsförstärkning ("transformation toughening")
 - Iden är att man bildar en komposit där partiklarna är i ett metastabilt tillstånd som har mindre volym än det stabila
 - Om sedan en spricka uppstår, kommer spänningen kring den att få partiklarna att göra en fasomvandling till ett stabilt tillstånd med större volym
 - Detta i sin tur orsakar en kompressiv spänning kring sprickan, som hindrar dess framfart!





Kol-kol-kompositer

- En av de mest avancerade kompositklasserna är de så kallade kolfiber-förstärkta kolmatriskompositerna, ofta kallade kortare **kol-kol-kompositer** eller **kolfiber-kolkompositer** ("CFC")
 - De är dyra, men har en del användningsområden
- De är unika i att de kan behålla bra mekaniska egenskaper upp till ~ 2000 °C
 - Därmed används de i extremt termiskt krävande tillämpningar som raketmotorer, rymdskyttelns värmeplattor och fusionsreaktorers inre väggar



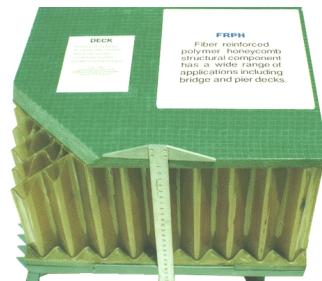
Hybridkompositer

- Med hybridkompositer avses sådana där två eller flera olika typerns fibrer används i samma matris
- Ytterligare möjligheter för att åstadkomma förbättrade egenskaper
- Ett vanligt exempel är glasfiber-kolfiber-hybrider där båda typernas fibrer kombineras i samma polymermatris
 - Glasfiber används som en del för att sänka på priset jämfört med ett rent kolfibermaterial



3.9.3. Strukturella kompositer

- Med strukturella kompositer avses sådana vars egenskaper inte bara beror på beståndsdelarna, utan också på hur de är geometriskt ordnade
- Dessa är ofta helt makroskopiska
- Trädmaterial är ofta strukturella kompositer: fanerskivor, parkett mm.

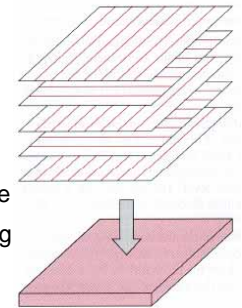


[<http://www.ksci.com/>]



Laminat

- Med laminat avses lagerkompositer där varje lager har en fördelaktig styrke-riktning
 - Dessa lager placeras sedan ovanpå varandra i någon bestämd vinkel mellan lagrena
 - Typiskt 90°
 - Varje dellager kan i sig vara en ordnad fiberkomposit
 - Den totala styrkan är bra i alla riktningar
 - Men inte lika bra som om alla lager skulle vara lika riktade, mätt i just denna riktning
- Exempel: fanerskivor

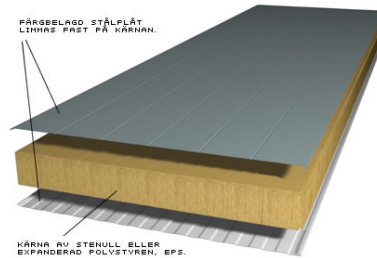




Sandwichpaneler

- Med sandwichpaneler (joo, det är korrekt svenska) avses strukturella kompositter där de övre och nedre lagrena är mycket starka, som omger ett inre lager ("kärna") som är mycket lättare och inte så stark
- Avsikten är att spara antingen på materialets pris eller vikt
- Men kärnan har ändå en del funktioner:

- Den hindrar hoppresning i höjdlid
- Den hindrar skjuvning av övre och nedre lagret



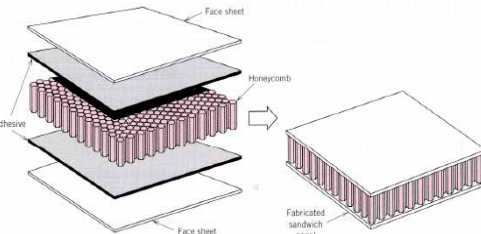
45



Sandwichpaneler

- Mellanlagret kan som enklast vara ett homogent material som polymerskum, gummi, cement, balsaträd, stenull
- En viktig variant är de där kärnan har en struktur i sig

- Ofta bikupe-struktur: hexagonalt, fyller rymden bra

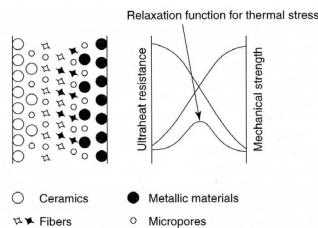


46



3.9.4. Funktionellt graderade material

- En speciell variant av hybridkompositter är **funktionellt graderade material**
- I dessa är målsättningen att tåla extrema temperaturgradienter
 - T.ex. iden för rymdflygplanet på 80-talet (som sedermera skrotades) skulle ha krävt material som tål extrem hetta på ytan, men som ändå leder värme bra för att inte överhettas
- En ide att åstadkomma detta var att ha kerampartiklar på ytan, och metall inuti med fibrer emellan



47



Funktionellt graderade material

- Funktionellt graderade material kan också vara material med helt enkelt en koncentrationsgradient som varierar över ett ytlager
 - Ytbeläggningsmetoder kan användas för att tillverka sådana
- Funktionellt graderade material finns också i naturen
 - T.ex. majs och bambu har hårda fibrer nära ytan, färre av dem inuti: ger styrka att hålla formen

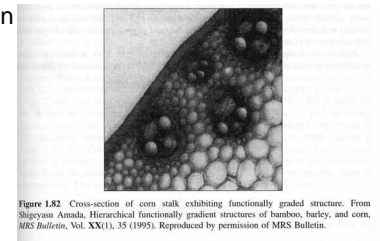


Figure 1.82 Cross-section of corn stalk exhibiting functionally graded structure. From Shigeo Amada, Hierarchical functionally gradient structures of bamboo, barley, and corn, *IGES Bulletin*, Vol. XX(1), 35 (1995). Reproduced by permission of MRS Bulletin.

48