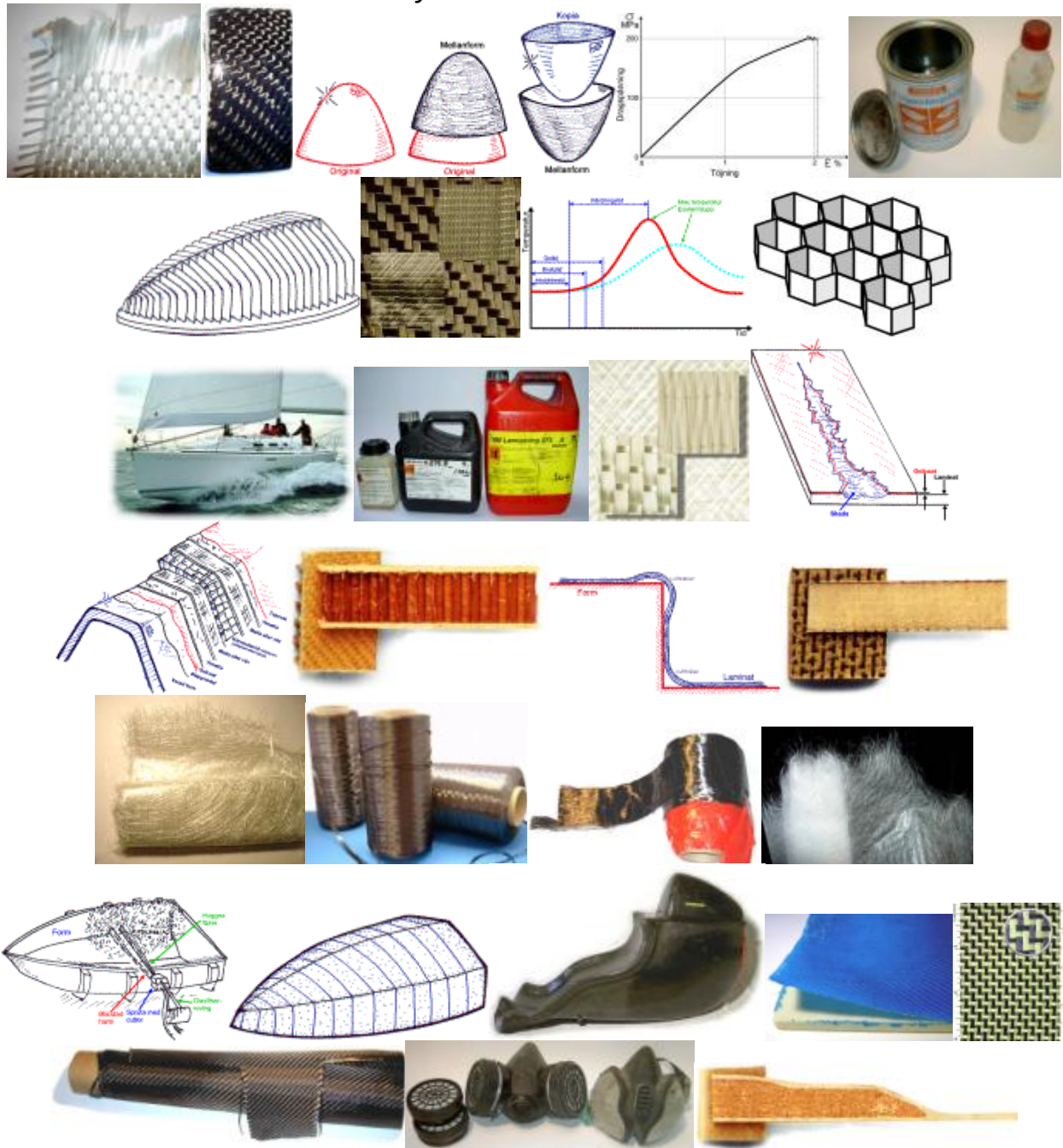


Fiberkompositlaminering

Handbok kring konstruktion med **fiberarmerade hårdplaster**
för hobbybruk och mindre industri



Lars Viebke
viebke@kth.se

Fiberkompositlaminering

En välillustrerad informativ handbok kring utveckling, konstruktion och reparation med fiberarmerade hårdplaster, för privatpersoner till mindre industriell nivå.

Handboken tar upp de vanligaste hårdplasterna och armeringsfibrerna, dess egenskaper och hur de skall utnyttjas, de vanligaste lamineringsmetoderna, formar, sandwichmaterial och tillsatsmaterial.

Handboken tar även upp grundläggande hållfasthetslära fokuserat på armerade hårdplaster, vad konstruktören bör tänka på, tips och vanliga fel samt praktiska exempel.

Fiberkompositlaminering är skriven av Lars Viebke, med flerårig praktisk erfarenhet av konstruktion med armerade hårdplaster. Handboken är ursprungligen skriven för KTH som projekt inom maskinteknik.

Webversion och uppdateringar:

<http://www.fiber.get.to>

Förord

Jag har mångårig erfarenhet av fiberkompositlaminering och kompositkonstruktion på hobbybasis, av allt ifrån båtlagning och jollar till helt nya cykelkonstruktioner, med flera typer av armeringsfibrer och hårdplaster. Den kunskap jag har införskaffat på praktisk väg har kompletterats med information via Internet, litteratur och datablad.

Jag har därigenom uppmärksammat ett det finns mycket lite litteratur och samlad information lämpligt för privatpersoner som skall påbörja allt ifrån enkla till komplexa fiberkompositkonstruktioner. Den litteratur och information som finns idag är oftast antingen på för låg nivå, för teoretisk eller för ensidig.

Genom min hemsida kring bygget av bla en liggcykel i kolfiberkomposit som jag konstruerat har jag främst via e-mail fått åtskilliga frågor från andra privatpersoner som också har uppmärksammat bristen på samlad lämplig information kring fiberkompositlaminering. Intentionen med denna rapport har därför varit att om möjligt fylla igen det gap som nu finns.



Lars Viebke under cykelsemester i Italien med egenkonstruerad kolfiberliggcykel

Copyright © 2003
Lars Viebke

Text, fotografier och illustrationer Lars Viebke om inget annat anges.

Spridning, kopiering och eftertryck tillåts om källan och författaren,
Lars Viebke, nämns tydligt i direkt samband.

Innehållsförteckning

1	Inledning	6
2	Grundläggande hållfasthet och materiallära.....	7
2.1	Hållfasthet	7
2.1.1	Draghållfasthet	8
2.1.2	E-modul	8
2.2	Deformation, skillnaden mellan olika material	8
2.3	Hållfasthet för armerade hårdplaster	10
2.3.1	Dragbelastning	10
2.3.2	Tryckbelastning	11
2.3.3	Skjuvbelastning	12
2.3.4	Böjbelastning.....	12
3	Bindmedel / Matris.....	13
3.1	Polyester	15
3.2	Vinylester	19
3.3	Epoxi	20
3.4	Val av hårdplast.....	25
4	Armeringsfibrer	26
4.1	Glasfiber	29
4.1.1	E-glas.....	30
4.1.2	S-glas	30
4.1.3	C-glas	30
4.1.4	Specialglasfiber	30
4.2	Kolfiber	31
4.2.1	Standard.....	32
4.2.2	HS – High Strength	32
4.2.3	IM – Intermediate Modulus.....	33
4.2.4	HM – High Modulus	33
4.2.5	UHM – Ultra High Modulus	33
4.2.6	Kolfiberjämförelse	34
4.3	Aramid.....	34
4.3.1	Aramidjämförelse.....	36
4.4	Termoplastfibrer.....	36
4.5	Dyneema.....	37
4.6	Naturfibrer	38
4.7	Specialfibrer	38
4.8	Val av armeringsfiber.....	39
5	Fibrernas form vid laminering.....	41
5.1	Flock.....	42
5.2	Matta.....	42
5.3	Roving	44
5.4	Enkelriktad väv	45
5.5	Väv	46
5.6	Val av fiberutformning.....	48
6	Sandwich	49
7	Tillsatsmaterial, fyllmedel	54

8	Lamineringsmetoder	56
8.1	Handläggning	57
8.2	Sprutning	59
8.3	Pre-preg	60
8.4	Bagging	60
8.5	Värmehärdning	61
9	Formar	62
9.1	Typer av formar	62
9.2	Tillverkning av formar	63
9.3	Utnyttjande av formar, tips	65
9.4	Från form till konstruktion	67
10	Tänka på vid fiberkompositkonstruktioner	70
10.1	Dimensionering	70
10.2	Felrisker och vanliga fel	72
11	Reparation	74
11.1	”Standardskada” i laminat	74
11.2	Hål i laminat	75
11.3	Sandwichlaminat	76
11.4	Delaminering av sandwichlaminat	76
11.5	Trä	77
11.6	Bucklor, rosthål i stål	77
11.7	Böldpest	78
12	Säkerhet	79
12.1	Laminering	79
12.2	Bearbetning	80
13	Materialegenskaper	81
13.1	Draghållfasthet	81
13.2	E-modul	82
14	Jämförelse med konstruktionsmetaller	83
14.1	Stål	83
14.2	Aluminium	83
14.3	Titan	84
14.4	Magnesium	84
14.5	Hållfasthetsjämförelse	84
14.6	Metaller tillsammans med armerad plast	85
15	Experiment - Lamineringsprov för bakkåpa	86
15.1	Testmoment	86
15.2	Testresultat	88
16	Källhänvisning	92
17	Inköpskällor för kompositmaterial	94
18	Datablad	96
19	Varumärken, handelsnamn	99
20	Ordlista	100

1 Inledning

Komposit

Med komposit menas ett konstgjort sammansatt material där två eller flera material med olika egenskaper ingår. Det handlar ofta om ett svagare material som binder samman starkare material. Det starkare materialet fungerar då som armering (förstärkning) för det ihopbindande materialet. Det vanligaste exemplet på en armerad komposit är betong som är armerad med armeringsjärn. Betongen har dålig draghållfasthet men klarar bättre tryck, medan tunna armeringsjärn har bra draghållfasthet men böjs om de utsätts för tryck. Men tillsammans bildar de ett generellt konstruktionsmaterial.

Fiberkomposit

I en fiberkomposit utnyttjas armeringsfibrer som binds samman med en matris, oftast en plast för att bilda ett s.k. laminat. Armeringsfibrerna har högre draghållfasthet än plasten men om armeringsfibrerna inte binds samman av plasten klarar de inte av att ta upp någon annan belastning än ren dragbelastning.

Tillsammans bildas konstruktionsmaterialet **armerad plast** – AP.

Användningsområden

Användningsområdena för armerade plaster är många. Materialet medger stor flexibilitet, stora möjligheter vid utformning, det är enkelt att konstruera även i små volymer. Armerade plaster har även hög tålighet mot omgivande miljöpåverkan och armerade med mer exklusiva fibrer, har armerade plaster mycket bra mekanisk prestanda.



Det största användningsområdet för armerad plast är i marina tillämpningar, främst mindre båtar, då oftast i glasfiberarmerad polyester som utnyttjas för det låga priset och god väderhållighet men även större fartyg, militära och civila, har börjat byggas av armerad plast.

Armerad plast utnyttjas även i stor omfattning i byggindustrin, främst glasfiberarmerad polyester.

I fordon, bilar, lastbilar och tåg utnyttjas fiberarmerade plaster främst pga de designmöjligheter materialet ger även om mer exklusiva fiberarmerade plaster har börjat utnyttjas för att få ner vikten på fordonen och därmed få bättre bränsleekonomi.

Armerad plast är vanlig i flygindustrin där främst epoxi och vinylester armeras med mer exklusiva fibrer som kolfiber och aramid pga dessa kompositers utomordentliga mekaniska egenskaper i förhållande till vikten.

Även i sportartiklar återfinns ofta armerad plast, från enkla billiga till högprestanda fiberkompositer.

Fördelar för privatpersoner

Armerad plast ger privatpersoner och mindre industrier stora möjligheter att ta fram konstruktioner, bygga och laga existerande konstruktioner med resultat som ofta inte hade varit möjligt om andra material hade utnyttjats och ofta till lägre kostnad.

Kraven på specialutrustning är små och genom att utnyttja högprestandafibrer ges möjligheter att ta fram konstruktioner med en mekanisk prestanda som med andra konstruktionsmaterial hade varit närmast omöjligt utan tillgång till en större maskinpark och specialkunskap.

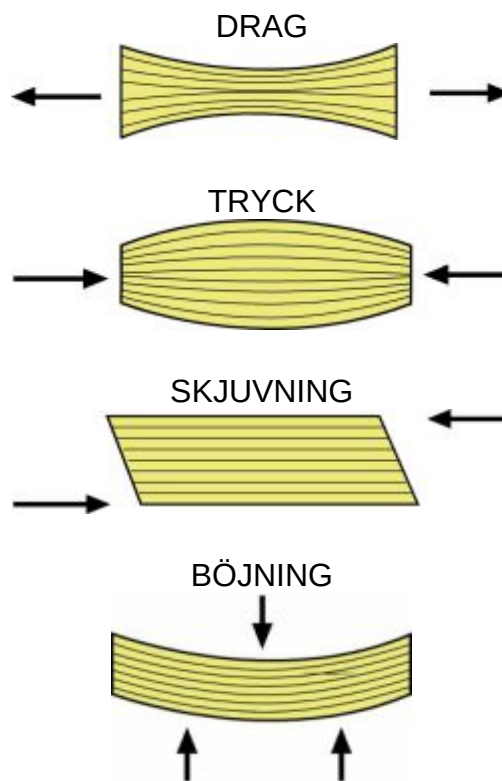
2 Grundläggande hållfasthet och materiallära

När man jämför material med varandra kan man tala om materialens hållfasthetsegenskaper. Det innebär generellt hur **starkt** och **styvt** materialet är men även mer specifikt hur materialet påverkas då det belastas.

2.1 Hållfasthet

Olika material är olika starka. Det innebär att när två provbitar av olika material utsätts för en lika stor belastning, av samma typ och i samma riktning så kan det ena provbiten brista eller deformeras medan den andra provbiten återgår till sin ursprungliga form efter att den har slutat att belastas. Det material som höll har högre hållfasthet vid den specifika belastningen. Detta betyder dock inte att den provbit som höll har högre hållfasthet vid alla typer av belastningar. Man skiljer därför på hållfasthetsegenskaperna vid olika belastningsfall.

Det förekommer fyra grundbelastningsfall som ett material kan utsättas för:



Utifrån hur mycket belastning en provbit med en specifik tvärsnittsarea klarar innan provbiten brister eller deformeras vid ett visst belastningsfall kan man avgöra materialets hållfasthet vid belastningsfallet. Detta ger grunddata som beskriver hur starkt ett material är vid en viss belastning: draghållfasthet, tryckhållfasthet, skjuvhållfasthet och böjhållfasthet.

2.1.1 Draghållfasthet

Ofta är det enklast att mäta hållfastheten vid belastningsfallet: drag, varvid man får fram draghållfastheten för materialet.

Definition

Man definierar den kraft i Newton [N] som krävs för att dra av eller deformera en provbit med en tvärsnittsarea på en kvadratmeter [m²]. Enheten på dragspänningen (σ) är pascal [Pa], ofta med prefixet mega [M], dvs en miljon.

Om det tex krävs en kraft på 200N för att dra av eller deformera en provbit med en tvärsnittsarea på 1mm², så är materialets draghållfasthet 200MPa:

$$200[N] / 1 \cdot 10^{-6}[m^2] = 200 \cdot 10^6[Pa] = 200[MPa]$$

2.1.2 E-modul

Alla material är mer eller mindre elastiska. För tex gummi är elasticiteten hög medan den är lägre för stål. Detta innebär att ett gummiband med lika stor tvärsnittsarea som motsvarande stålstång sträcks betydligt längre vid samma belastning. Stål är alltså styvare än gummi.

Måttet på **styvheten** för ett material kallas elasticitetsmodulen, eller E-modulen för materialet. Stål har alltså högre E-modul än gummi trots att gummi är mer elastiskt.

På samma sätt som med hållfastheten kan E-modulen beskrivas vid olika belastningsfall: E-modulen vid drag, tryck, skjuv och böjning. Om inget annat anges vid beskrivningen av E-modulen för ett visst material avses vanligtvis E-modulen vid drag.

Definition

Man definierar den dragspänning (σ) i pascal [Pa] som krävs för att uppnå en viss töjning (ϵ). Enheten på E-modulen är pascal [Pa], ofta med prefixet giga [G], dvs en miljard.

Om det tex krävs en kraft på 200 N för att sträcka en provbit med en area på 1mm² 2 procent är materialets E-modulen (drag) 10GPa:

$$200[N] / 1 \cdot 10^{-6}[m^2] / 0,02 = 100 \cdot 10^9[Pa] = 10[GPa]$$

2.2 Deformation, skillnaden mellan olika material

Olika material påverkas på olika sätt då de belastas. Vissa bibehåller sin form ända tills de brister och återgår till sin ursprungliga form om de slutar att belastas innan dess. Detta gäller tex keramer och styva plaster och fiberarmerade plaster. Andra material som metaller och sega plaster deformeras innan brott och återgår då inte till sin ursprungliga form.

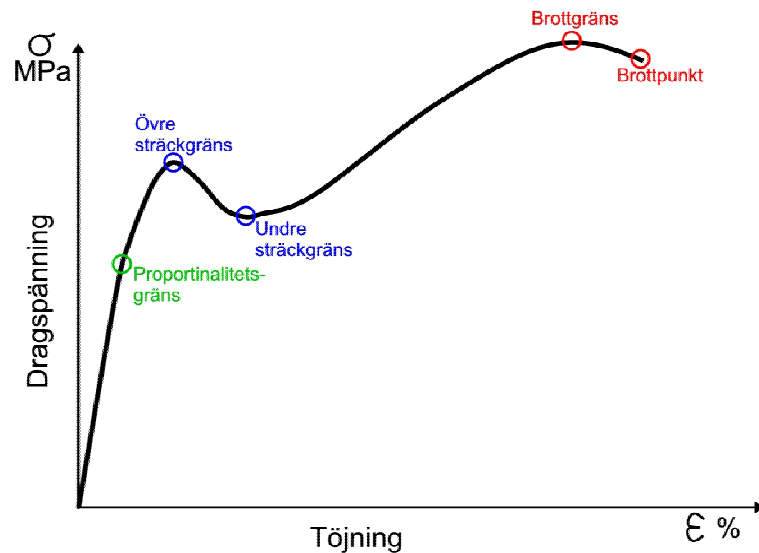
Då ett material utsätts för en så stor belastning att den deformeras säger man att den når sin **sträckgräns**. Då materialet utsätts för så stor belastning att ett brott sker når den sin **brottgräns**. Under belastande av ett material är vanligtvis deformationen proportionell mot kraften under den första delen av sträckningen för att sedan minska, vilket sker när man har nått materialets **proportionalitetsgräns**.

För att ta reda på hur ett material belastas kan man studera ett **spänning-töjningsdiagram** för materialet.

Spänning-töjningsdiagram tas fram genom att en provbit dras med hjälp av en utrustning som hela tiden mäter kraften som provbiten utsätts för och hur mycket provbiten töjs medan belastningen av provbiten successivt ökas.

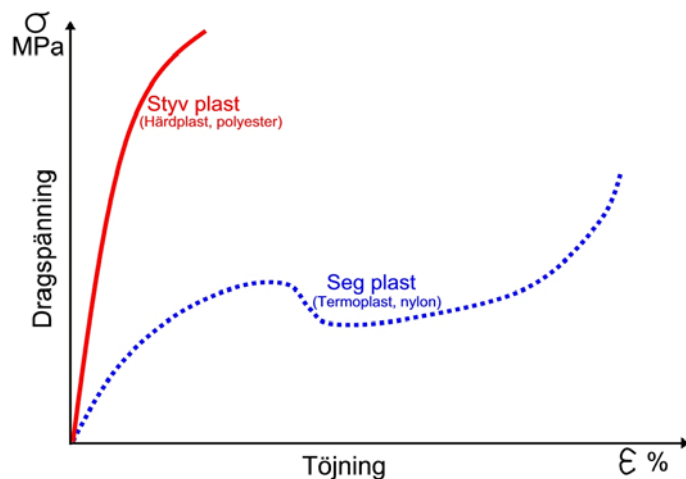
Nedan visas ett typiskt spänning-töjningsdiagram för de vanligaste konstruktionsstålen.

Ur diagrammet kan det utläsas när materialet deformeras, vilket sker när kurvan viker av efter övre sträckgränsen samt när materialet brister, vilket sker efter brottgränsen.



Schematiskt spännings-töjningsdiagram för stål

För de material där ett brott sker innan att materialet har deformerats talar man om ett **sprött brott**. I ett spänning-töjningsdiagram för ett sådant material, tex styv plast som syns i diagrammet nedan, materialet deformeras inte innan brott i någon större omfattning och kurvan viker inte av så mycket innan brottpunkten.



Schematiskt spänning-töjningsdiagram för styv plast respektive seg plast

Även ett exempel spänning-töjningsdiagrammet för en seg plast är plottat i diagrammet (streckad kurna). Kurvan liknar den för mjukt stål, då sega plaster deformeras innan brott (då mikrosprickor uppstår i plastmaterialet), men den stora skillnaden mot metaller är att seg plast saknar proportionalitetsgräns eller någon del på kurvan där en ökad dragspänning ger en proportionellt ökad töjning.

2.3 Hållfasthet för armerade hårdplaster

Eftersom armerade hårdplaster är kompositer där olika material med olika egenskaper samverkar är hållfasthetsegenskaperna annorlunda än för homogena material som metaller eller oarmerad plast.

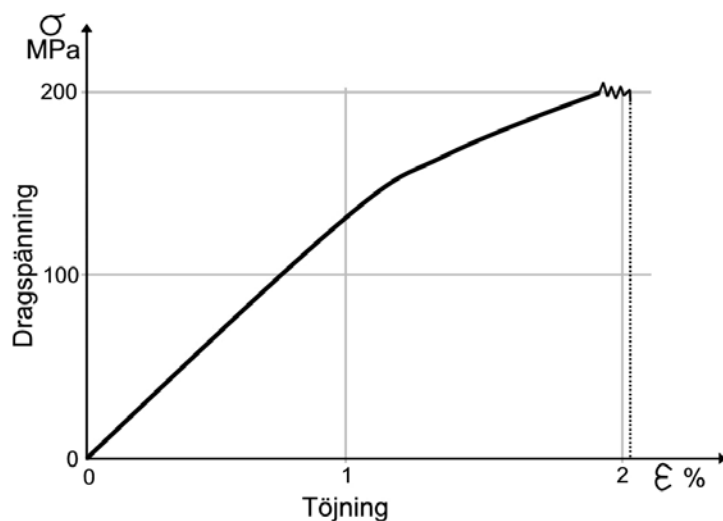
Egenskaperna hos materialet påverkas av plastens mekaniska egenskaper, fibrernas egenskaper, hur plasten binder samman fibrerna och hur fibrerna är fördelade, deras riktning i materialet, längden på de ingående fibrerna osv. De många faktorerna gör beräkningar av hållfastheten hos en konstruktion av fiberarmerad plast ofta betydligt mer komplex än beräkningarna för en konstruktion av ett homogent material.

I många fall genomförs därför inga regelrätta hållfasthetsberäkningar då privatpersoner eller mindre industrier tar fram enstaka konstruktioner i fiberarmerad plast. Dock krävs att konstruktören har ett "hum" om hur materialet fungerar och påverkas beroende på de olika faktorerna för han eller hon skall kunna ta fram någorlunda optimerade konstruktioner i fiberarmerad plast utifrån de förutsättningar som finns.

2.3.1 Dragbelastning

Om en fiberarmerad hårdplast utsätts för dragande belastning styrs materialets draghållfasthetsegenskaper främst av fibrernas hållfasthetsegenskaper, eftersom fibrernas draghållfasthet är betydligt högre än hårdplastens.

Vid dragande belastning är töjningen relativt proportionell mot belastningen ända tills den armerade hårdplasten tvärt går av.



Typiskt spänning-töjningsdiagram för en fiberarmerad hårdplast. Observera knäcken, delar av fibrerna kan nu ha gått av, bindning mellan fibrerna och matrisplasten kan ha försämrats eller mikrosprickor i matrisplasten kan ha uppkommit.

E-modulen (drag) kan därför med relativt stor säkerhet beräknas genom att draghållfastheten divideras med materialets töjning vid brott.

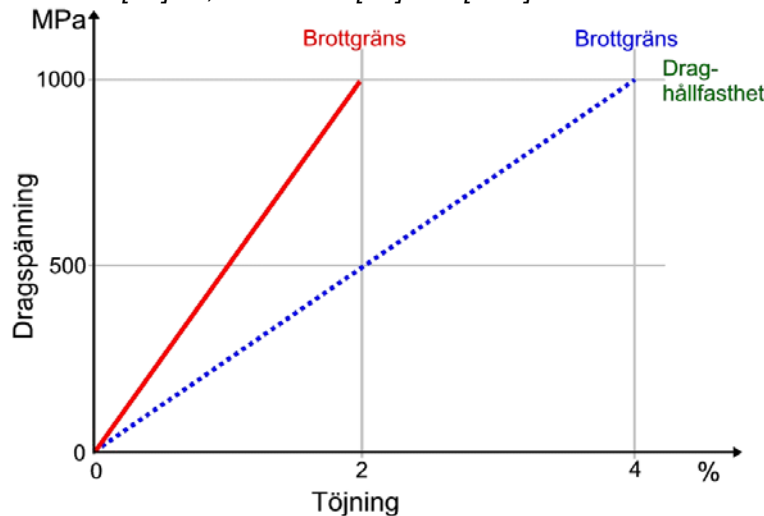
Genom att studera spänning-töjningsdiagram där töjningen och spänning fram till brott bildar en linjär kurva kan man bedöma armeringsplastens E-modul (drag), detta genom att studera kurvans lutning. En brantare kurva innebär en högre E-modul för materialet.

I spänning-töjningsdiagrammet nedan kan man se kurvor för två material med samma draghållfasthet (1000MPa) men olika töjning vid brott (2% respektive 4 %).

E-modulen (drag) för dessa material är alltså 50 GPa respektive 25 GPa:

$$1000 \cdot 10^6 [\text{Pa}] / 0,02 = 50 \cdot 10^9 [\text{Pa}] = 50 [\text{GPa}]$$

$$1000 \cdot 10^6 [\text{Pa}] / 0,04 = 25 \cdot 10^9 [\text{Pa}] = 25 [\text{GPa}]$$



Förenklat spänning-töjningsdiagram för två kompositmaterial med samma draghållfasthet men olika töjning vid brott, (typiska kurvor för längsriktat laminat med kolfiber respektive glasfiber)

2.3.2 Tryckbelastning

Rena armeringsfibrerna kan bara ta upp ren dragande belastning och det är först efter att de har bundits samman av hårdplasten som de även kan ta upp den motsatta belastningen dvs tryckande belastning.

Vid tryckbelastning av en fiberarmerad plast styrs hållfasthetsegenskaperna både av fibrernas hållfasthetsegenskaper men även till stor del av plastens möjlighet att binda samman fibrerna och plastens egna hållfasthetsegenskaper.

Trycket påverkar den fiberarmerade plasten så att fibrerna tvingas bukta och pressas isär medan plasten både pressas samman och dras isär.

Då man teoretisk skall beräkna tryckhållfastheten för en fiberarmerad hårdplast måste man se till en rad faktorer, som bla fibrernas draghållfasthet, plastens bindning mot fibrerna och den rena plastens tryck- och draghållfasthet. Dessutom ändras vissa faktorer från fall till fall, bla hur väl plasten binder fibrerna men även plastens mekaniska egenskaper, beroende på hur lamineringen och hårdningen har gått till samt vilken aktuell temperatur som materialet utsätts för.

Detta gör teoretiska beräkningar av tryckhållfastheten hos en fiberarmerad hårdplast komplexa och inte helt tillförlitliga.

2.3.3 Skjuvbelastning

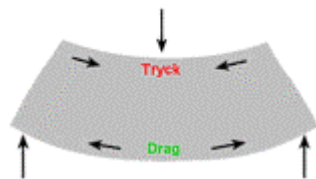
Vid skjuvbelastning av en fiberarmerad hårdplast tvingas fibrerna glida gentemot varandra. Detta gäller speciellt om skjuvbelastningen påverkar ett traditionellt fiberlaminat (flerlayerskomposit) där fibrerna sitter i lager.

Plastens bindande egenskaper av fibrerna samt plastens direkta skjuvhållfasthetsegenskaper styr till största del laminatets totala skjuvhållfasthet.

För att beskriva bindningsstyrkan hos plasten samt armeringsfibrernas möjlighet att bindas av plasten i ett fiberlaminat mäts bla något som kallas **ILSS** (*interlaminar shear strength*) vilket ger ett mått på laminatets **spjälkhållfasthet** längs laminatet.

Liksom för tryckbelastning är det komplicerat att beräkna skjuvhållfastheten teoretiskt för en fiberarmerad hårdplast och hur en konstruktion av armerad hårdplast påverkas exakt vid skjuvande belastning. Beroende på bla lamineringsmetoden och omgivande temperatur är det inte heller säkert att teoretiska beräkningar blir tillförlitliga.

2.3.4 Böjbelastning



Vid böjande belastning av tex en balk som i den schematiska figuren till vänster uppstår en kombination av tre belastningsfall: tryckbelastning på ovansidan, dragande belastning på undersidan och skjuvbelastning mellan balkens övre del och undre del.

I en fiberarmerad plast gör kombinationen av belastningarna att den fiberarmerade plastens totala böjhållfasthet både beror på fibrernas och plastens hållfasthetsegenskaper, plastens möjlighet att binda fibrerna, men även fibrernas mängd, riktning och längd i kompositen.

I en homogen balk ökar **böjstyvheten** med kubiken av tjockleksökningen på balken.

En dubbelt så tjock balk ger alltså 8 ggr så hög böjstyvhet ($2^3 = 8$) medan böjstyvheten ökar med 27 gånger om balken är tre gånger så tjock ($3^3 = 27$).

I en homogen balk ökar **böjhållfastheten** för balken med kvadraten av tjockleksökningen.

En dubbelt så tjock balk är alltså 4ggr så stark ($2^2 = 4$) medan en tre gånger så tjock balk är 9 ggr så stark ($3^2 = 9$).

Vid andra former (cylindrisk, rör mm) påverkas böjstyvheten och böjhållfastheten annorlunda med ökade dimensioner, se facklitteratur tex *Karlebo handbok*.

*Det finns många ytterligare hållfasthetsbegrepp och det går fördjupa sig nästan hur mycket som helst men för att konstruera i fiberarmerad hårdplast på hobbybasis eller mindre industriell skala där kraven inte är så höga, där det inte finns några krav på en optimal konstruktion med maximal styrka och styvhet, minimal vikt och materialåtgång osv krävs ofta inte mer än goda grundkunskaper och **sunt förnuft!***

3 Bindmedel / Matris

Matrisens uppgift i ett fiberkompositlaminat är att binda samman armeringsfibrerna och hålla ihop laminatet. I en fiberkomposit är matrisen vanligtvis en plast. Plasten kan antingen vara en termoplast eller en härdplast. En termoplast formas efter att den har värmts upp varvid den mjuknar medan en härdplast formas genom att den tillåts övergå från flytande till fast form genom en kemisk reaktion. Denna kemiska reaktion, då plasten härdar och molekyler i plasten tvärbinds, kan sättas igång genom att en substans tillsätts, en s.k. katalysator / härdare eller att yttre energi i form av värme eller UV-strålning tillförs härdplasten. Härdningsreaktion är irreversibel, dvs kan bara ske åt ett håll, medan termoplaster generellt kan smältas ner och formas om.

Fiberkompositlaminat som produceras av privatpersoner eller vid industriell produktion i mindre serier baseras oftast på härdplaster snarare än termoplaster. Även där man eftersträvar fiberkompositlaminat med hög hållfasthet och bra mekaniska prestanda baseras dessa laminat oftast på härdplaster.

De krav man ställer på härdplasten i fiberkompositlaminat är dessa:

- Goda bindande egenskaper av armeringsfibrer
- Goda mekaniska egenskaper
- Hög motståndskraft mot yttre mekanisk påverkan
- Hög motståndskraft mot yttre miljöpåverkan

För att ovanstående krav skall uppfyllas krävs att plasten i härdat skick är tillräckligt stark, styv och flexibelt. Brottöjningen bör vara längre än vad den är för de armeringsfibrer som härdplasten skall binda samman. Samtidigt är det viktigt att drag- och tryckhållfastheten är hög och motsvarande E-moduler, för att plasten skall kunna ta upp och vidareförmedla skjuvbelastningar mellan de armeringsfibrer som den binder samman.

Härdplasten bör tåla slag i viss omfattning och kunna skydda de känsliga armeringsfibrerna.

Det krävs även att plasten i härdat skick i tillräcklig omfattning tål den yttre miljö som laminatet kan utsättas för både i fråga om vätskor, kemikalier, gas samt solljus.

Men för att laminatet skall uppnå de krav som ställs krävs först och främst att härdplasten på bästa möjliga sätt kan binda samman armeringsfibrerna. Detta innebär dels att plasten skall ha god vätande förmåga, är anpassad till de fibrer som skall armeras, samt bibehåller bindningen mellan fibrerna under hela härdningsprocessen.

Det förekommer främst tre olika härdplaster som matris i fiberkompositer:

- **Polyester**
- **Vinylester**
- **Epoxi**

Översikt – de vanligaste hårdplasterna vid fiberkompositlaminering:

Matris / hårdplast	Användningsområden	Fördelar	Nackdelar
Polyester	Alla typer av tillämpningar som inte kräver maximala mekaniska egenskaper. Armeras främst med glasfiber (E-glas), ofta korthuggen matta eller automathuggen roving. Marin- och fordonsindustrin.	+ Lägsta priset av alla tillgängliga hårdplaster + Enkel att använda	- Begränsade mekaniska egenskaper - Hög styrenavdunstning vid öppen laminering - Stor krympning vid härdning - Begränsad arbetstid vid laminering
Vinylester	Tillämpningar som kräver högt motstånd mot yttre miljöpåverkan och kemikalier. Tillämpningar som kräver hög prestanda i förhållande till priset. Armeras med glasfiber (E-glas), kolfiber, aramid och Terylene. Främst marina tillämpningar och kemiska hålltankar.	+ Mycket högt motstånd mot yttre miljöpåverkan, högt kemikalimotstånd + Bättre mekaniska egenskaper än polyester	- Högre pris än polyester - Värmehärdning krävs för att uppnå goda mekaniska egenskaper - Styrenavdunstning vid öppen laminering - Stor krympning vid härdning
Epoxi	Främst högprestandatillämpningar. Armeras med glasfibervävar (E-glas), kolfiber, aramid och teryleneväv. Limning av kompositer, metall och trä. Kallbakning av trä. Utnyttjas som fuktspärr (böldspärr) på polyesterlaminat (AP-båtar). Marin-, fordons-, flygindustrin, sportartiklar, militärindustrin.	+ Goda mekaniska egenskaper + Mycket goda limmande egenskaper + Liten krympning vid härdning + Lågviskös - snabb och god vätning av armeringsfibrer + Högt motstånd mot vatten, låg vattenabsorbtion + Tillgängligt i kvalitéer med lång arbetstid vid laminering (värmehärdande) + Tillgängligt i kvalitéer med hög temperaturlåghet (värmehärdande) + Lång hållbarhet för ohärdat harts + Oftast lösningsmedelsfri + Ofta optiskt klar, utnyttjas vid laminering med kolfiber för utseendet	- Högre pris än polyester och vinylester - Kritiskt att bas och härdare blandas rätt - Gulnar vid exponering av UV-ljus - Allergiframkallande vid hudkontakt

3.1 Polyester

Den särklass vanligaste hårdplasten för fiberkompositlaminering är polyester eller mer korrekt, omättad polyester. Omättad polyester kallas även esterplast eller ”båtplast”.



Polyesterharts och katalysator / hårdare (MEK-peroxid)

Katalysator

För att polyestern skall härda krävs att en hårdare eller en s.k. katalysator tillförs. Denna baseras oftast på en organisk MEK-Peroxid (Metyl Etyl Keton Peroxid). Mängden inblandad katalysator är oftast någon eller några procent av basen. En för hög inblandning av katalysator ger ett snabbt härdningsförlopp, hög värmeutveckling och risk för att laminatet spricker eller att mikrosprickor uppkommer i laminatet, medan en för låg inblandning ger risk för allt för långa härdningstider och att laminatet inte genomhärdat utan snarare torkar (styrenet avdunstar) varvid laminatet blir gummiliknande. Det finns stor risk för att polyestern underhärdat om laminatet är tunnt, ej är täckt och den omgivande temperaturen är låg (under rumstemperatur).

Både vid för snabb härdning och underhärkning försämras laminatets hållfasthetsvärden kraftigt.

Accelerator

Vanligtvis tillförs även en accelerator varvid härdningstiden förminskas och laminatet blir välgenomhärdat. Polyester för rumstemperaturhärdning är ofta föraccelererad, dvs acceleratorsubstansen är förinblandad i den ohärdade polyesterhartsen, omkring 2 procent av polyestervikten. Denna acceleratorsubstans för omättad polyester är ofta kobotloktat som ger en blåaktig färg till den ohärdade polyesterhartsen.

Speciell snabbhärddande polyester, eller polyester som kan härda vid låga omgivande temperaturer (ner mot noll grader) kräver en högre acceleratorinblandning eller en annan typ av acceleratortillsats (kallhärddande accelerator). Detta är ofta fallet med snabbhärddande polyesterspackel.

Härdningsförlopp

Omättad polyester är ofta tixotroperad för att inte rinna men samtidigt bibehålla sin vätande förmåga. Konsistensen för den ohärdade polyesterhartsen är vanligtvis sirapsliknande.

Då polyestern härdat övergår den inte kontinuerligt från flytande till fast tillstånd utan övergår först till ett s.k. gel-tillstånd då plasten till sin konsistens närmast kan liknas vid gelatin. Man

säger att laminatet har gelat. Efter att detta har skett finns det ingen möjlighet att i någon större omfattning ändra polyesterns form, laminatet som baseras på polyestern eller fortsätta att väta fibrer med polyestern.

Polyestern övergår sedan till fast tillstånd för att normalt genomhärda inom dygn till några veckor. Polyesterlaminatet når inte sin fulla styrka innan det genomhärdat. Laminatet blir inte heller helt luktfritt förrän efter denna tidsrymd eller mer har förflutit (beroende på hur väl polyesterlaminatet härdat).

Ohärdat polyesterharts accelererad med koboltnaftanat har ofta en blåaktig färg, om inga andra färgändrande ämnen (tex pigment) är tillsatta. Då härdning av denna polyester påbörjas övergår färgen mot gröngul för att då polyestern är genomhärdat få en bärnstensfärg. Om laminatet är armerad med ofärgade eller optiskt klara fibrer som tex glasfiber är det denna färg det sluthärdade laminatet får. Om härdningen sker för snabbt, om katalysatorinblandningen är för hög, den omgivande temperaturen för hög eller laminatskiktet för tjockt uppkommer ofta missfärgning av laminatet i form av bruna fläckar.

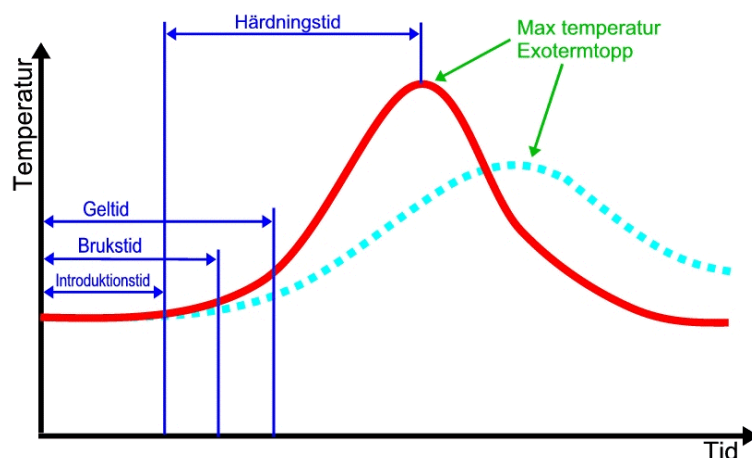
Härdningens temperaturberoende

Då polyestern härdat utvecklar den kemiska processen energi i form av värme.

Härdningsprocessen är alltså exoterm.

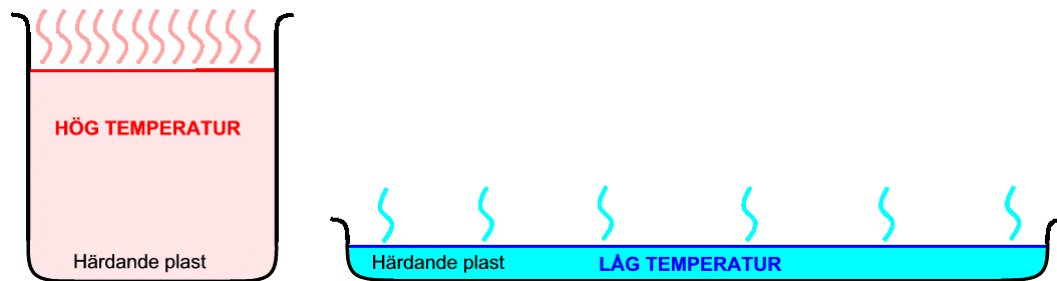
Om den härdande polyestern har stor volym i förhållande till ytan blir värmeavledningen låg och därmed blir polyesterns temperatur hög och vice versa.

En förhöjd temperatur, både i form av intern från den kemiska reaktionen och extern ger ett snabbare härdningsförlopp. Som tumregel kan man utgå ifrån att en temperaturhöjning med 1 grad ger 10% snabbare härdningsförlopp och tvärtom vid lägre temperatur. Härdreaktionen fördubblas alltså vid varje temperaturhöjning om 10°C, varvid härdningstiden minskar i samma omfattning.



Temperaturkurvor vid härdförloppet av polyester, hög inblandning av katalysator och / eller accelerator (heldragen kurva) resp. låg inblandning (streckad kurva)

Eftersom polyesterlaminatets tjocklek styr hur varmt laminatet blir under härdningsprocessen och ett för snabbt eller för långsamt härdande laminat ger risk för sämre hållfasthet är det viktigt att mängden inblandad härdare och accelerator samt typ av accelerator anpassas efter erforderlig laminattjocklek.



Två kärl med härdande plast med samma volym men olika värmeavledande yta, liten yta i förhållande till volymen ger hög temperatur och tvärt om

För att påskynda sluthärdningen kan polyesterlaminatet värmehärdas genom att laminatet tillförs en förhöjd temperatur under den senare delen av härdningsprocessen då laminatet har gelat och är hårt. Temperaturen beror på typen av polyester, acceleratormängd och inblandad mängd katalysator samt temperaturtåligheten för ingående armeringsfibrer och eventuellt sandwichmaterial. Vid värmehärdning av rumstemperaturhärdande polyester kan en lämplig värmehärdning ske i 3-6 timmar i 60-100 grader, alternativt med lägre temperatur, 40-50 grader under 12-24 timmar.

Det värmehärdade laminatet blir bättre genomhärdat och blir generellt starkare och styvare men samtidigt mer sprött.

Krympning

Då polyester härdras dras molekylerna samman. Detta medför att polyestern krymper under härdningen, kring 6-10%. 5-10% av krympningen sker då polyestern är flytande medan 90-95% sker efter att polyestern har hårdnat.

Krympningen ger upphov till en rad nackdelar:

- Laminatet ändrar något form och blir får inte perfekta mått
- Laminatet kan slå sig om plasthalten är ojämn pga armeringsfibrerna inte krymper med
- Laminatet får interna spänningar pga skillnaden mellan polyesterns krympning och fibrernas
- Fibrernas struktur framträder efter härdningen om laminering sker direkt mot form och inte gelcoat eller extra lager polyester appliceras mellan form och laminat
- Krympningen medför att polyester har dålig limmande förmåga mot styva material som inte krymper med

En fördel med polyesterns krympning är att polyesterlaminat enklare släpper från formar, speciellt honformar efter att laminatet har hårdnat.

Styren

Omättad polyester är lösningsmedelsbaserat där styren ingår med upp till 50%. Styrenet krävs för att polyestern skall kunna härda korrekt och utnyttjas för att sänka viskositeten för polyestern och därmed höja den vätande förmågan av de ingående armeringsfibrerna i fiberlaminat. Det är styrenet som ger den karakteristiska starka lukten, som även är farlig vid inandning. För att undvika allt för stor styrenavdunstning under härdningen är vanligtvis parafinwax inblandat i polyestern. Denna polyester, som även kan ha reducerad styrenhalt brukar benämnas

”miljöpolyester” eller LSE (lågstyrenavdunstande polyester). Vaxen kryper mot ytan och begränsar styrenavdunstningen under härdningsförloppet. Vaxskiktet begränsar även syrets påverkan på polyestern varvid härdat laminat inte blir lika klabbigt.

Olika polyesterkvaliteter och vad som karakteriserar dessa:

Vanliga:

- **ORTO-polyester** – god åldringsbeständighet, ekonomisk ”allroundpolyester” (tex Nordpol 41-90, Nordpol 440 M850)
- **Isoftalsyrapolyester** (ISO-polyester) – god kemikalieresistens och vattentålighet, lämpligt för tankar och formbyggen (tex Nordpol 34-50, Nordpol 720-700, Nordpol 720 M850)

Mindre vanliga:

- **Hetsyra-polyester** – god kemikalieresistens främst mot syror och organiska lösningsmedel
- **Bistenolpolyester** – god kemikalieresistens främst mot alkali
- **ISO-PNG-polyester** – god åldrings-, väder- och vattenbeständighet
- **NPG-polyester**

Specialpolyester:

- **Gjutpolyester** – helt ofärgad, optisk klar, otixotroperad specialpolyester för ingjutningar (tex Nordpol 34-50, Nordpol 340-500)

Gelcoat

Vid laminering i form där det krävs att den sida mot laminatet är närmst formen har hög ytfinish och gott skydd mot sol, vatten och mekaniskt slitage utnyttjas vanligtvis s.k. gelcoat.

Gelcoat, även kallat formpolyester, är en omättad polyester som är specialanpassad för att appliceras närmast formen och skydda fiberlaminatet. Polyestern tixotroperad till tjockflytande konsistens, och innehåller pigmentpulver ofta i ljusa färger, då mörka färger bleknar något vid långvarig exponering av solljus.

Gelcoatskiktet appliceras med en tjocklek på en halv till en millimeter. För att gelcoaten skall härda vid så tunna skikt är den föraccelererad och något högre katalysatorinblandning än för lamineringspolyester rekommenderas (vanligtvis 1,5-2%)

Gelcoaten är det ofta vita blanka ytterskiktet som återfinns på bla plastbåtar.

Topcoat

För att skydda polyesterlaminat som inte ligger mot en form utnyttjas ofta s.k. topcoat. Topcoat är vanligtvis gelcoat (ofta med grått pigment) där 4% paraffinvaxlösning tillsätts i hartsen. Under härdningen ”svettas” vaxen mot ytan och bildar ett tunt skikt som skyddar polyestern från att påverkas av luften, vilket annars skulle ha lett till att polyesterskiktet hade blivit något klabbigt även efter fullständig uthärdning. Därmed fungerar topcoat som en polyesterbaserad skyddande färg för laminatet innanför.

Spackel

Omättad polyester är en vanlig bas för plastspackel. Beroende på behov finns det spackel i alla möjliga former och med olika tillsatser.

De polyesterbaserade spackel som förekommer på marknaden är bland annat:

- Standard-plastspackel – generellt snabbhärdande polyesterspackel
- Finspackel – ger porfri yta
- Lättspackel – lättslipad
- Glasfiberspackel – inblandning av huggen glasfiber
- ”Flytande metall” – metalliknande färg, tillsatser som gör härdat spackel extra hårt
- Zinkspackel – inblandning av zinkpulver, rostskyddande galvanisering av plåt
- Elastiskt plastspackel – tillsatser som gör härdad spackel mer elastisk
- Gelcoatspackel – pigmenterad i anpassade färger för att använda vid reparation av tex glasfiberarmerade båtar (GRP-laminat)

Gemensamt för alla spackel är att de har tillsatser som ökar dess viskositet till trögflytande eller relativt fast. De flesta polyesterspackel är snabbhärdande, genom att de är föraccelererade speciell accelerator som tillåter spacklet att härda på bara några minuter även vid låg temperatur. Polyesterspackel innehåller liksom lamineringspolyester styren men pga den snabba härdningen är ofta styrenavdunstningen begränsad.

Polyestertillverkare – tillverkare av lamineringspolyester och märken tillgängliga i mindre volymer på svenska marknaden:

- Nordpol
- DSM Composite Resins
- HBP
- Juton
- Neste

3.2 Vinylester

Vinylester är starkt kemiskt besläktad med polyester men pga en hårdare kedjebindning mellan molekylerna har vinylester bättre mekaniska egenskaper än polyester.

Vinylestermolekylen har även färre estergrupper än polyester, och eftersom estergrupperna är känsliga för vatten (*hydrolys = sönderdelning genom vatten*) är vinylester mer resistent mot vattenexponering och exponering av många kemikalier.

Därför utnyttjas vinylester främst i lamineringssammanhang där bättre mekanisk prestanda eller bättre kemikalieresistens eftersträvas än vid motsvarande polyesterlaminat, främst i marina tillämpningar, kemiska hålltankar och pipelines.

Lamineringsförfarande

Vinylester lamineras på samma sätt som polyester.

Liksom polyestern är vinylester för laminering ofta föraccelerad.

Härdaren (katalysatorn) för vinylester är av peroxid-typ dock inte exakt samma som den som utnyttjas för att härda polyester (MEK-peroxid).

Styrenhalten är betydligt lägre i vinylester än polyester vilket gör att vinylester är mindre lämplig att armeras med korthuggen glasfibermatta där bindemedlet är av pulvertyp, då detta bindemedel kräver hög styrenhalt för att lösas upp. Korthuggen glasfibermatta med bindemedel av emulsionstyp fungerar dock bra att laminera.

Fibrer i form av vävar och roving sizad för både polyester och epoxi kan generellt utnyttjas. För att vinylesterlaminat skall uppnå maximal mekanisk prestanda krävs normalt att laminatet värmehärdas. Temperaturen höjs då kring den nylaminerade konstruktionen under det senare härdstadiet, efter att vinylestern har gelat. Vinylesterlaminatet blir då bättre genomhärdat och de kemiska bindningarna blir starkare.

Priset på vinylester är högre än för polyester men lägre än för epoxi, samma gäller hållfastheten. Därför utnyttjas ofta vinylester i laminat där kravet på hållfastheten är relativt hög men kostnaden för epoxi är omotiverat hög.

Vinylesterlaminat har en högre HDT än laminat baserade på rumstemperaturhärdande epoxi, dvs vinylesterlaminat mjuknar vid en högre temperatur. Detta gör vinylester till ett lämpligare matrisplast än epoxi för tunna enkellaminat som inte värmehärdas men kan utsättas för värme i ett senare skede (tex mörka konstruktioner som står i direkt solljus).

Exempel på vinylester för laminering tillgänglig i mindre kvaliteter på svenska marknaden är:
Nordpol Dion 9100

3.3 Epoxi

EP – EpoxiPlast är den starkaste härdplasten tillgänglig för fiberlaminering. Den höga vätande förmågan på armeringsfibrer, den goda sammanbindande förmågan av fibrerna och den låga krympningen gör att epoxifiberlaminat blir starka. Därför utnyttjas ofta lamineringsepoxi i laminat där man kräver hög styrka-vikt-förhållande, armerad med E-glasväv eller högprestandafibrer som kol- eller aramidfibrer.



Lamineringsepoxi NM275. Från höger till vänster: bas, härdare, accelerator

Epoxi har även låg vattenabsorption och används därför bla som skyddande skikt på polyesterlaminat för att undvika s.k. böldpest.

Till nackdelarna hör främst ett högre pris än för polyester och vinylester och att epoxilaminat har dålig UV-tålighet jämfört med polyester och vinylester och gulnar och blir matt vid långvarig exponering av solljus.

Lamineringsförfarande

Förhållandet mellan bas och härdare skiljer sig generellt kraftigt mellan esterplasterna och epoxi. För epoxi är härdarmängden ofta relativt stor i förhållande till mängden bas, från tiotalet procent till lika stora mängder härdare som bas, även om det skiljer mellan olika epoxityper och fabrikat. I motsats till för esterplaster är det mycket kritiskt att basen och härdaren blandas i exakt rätt förhållande och att bas och härdaren blandas mycket väl innan hartsen påförs väven. Annars riskerar epoxi härda dåligt varvid laminatet blir gummiliknande och hållfasthetsvärdena kraftigt försämrats.

I motsats till esterplasterna som genomgår ett gel-tillstånd vid härdningen där plasten blir geléliknande så härdar epoxiharts mer kontinuerligt även om benämningen ibland ändå används även för epoxi.

Den härdande epoxin går från flytande mot mer tjockflytande, till ett tuggummiliknande tillstånd men där plastens form fortfarande kan påverkas i viss omfattning till ett klubbfrött tillstånd för att slutligen bli genomhärdat och hårt.

Detta medför att man till viss gräns kan påverka ett härdande epoxilaminats form under härdningen om tex laminatet inte gärna vill följa en viss form. För att underlätta detta förfarande kan epoxilaminatet, då det har härdat såpass att den är klabbig och tuggummiliknande, penslas med nyblandad epoxiharts varvid tryckande verktyg som pensel eller roller inte klabbar fast.

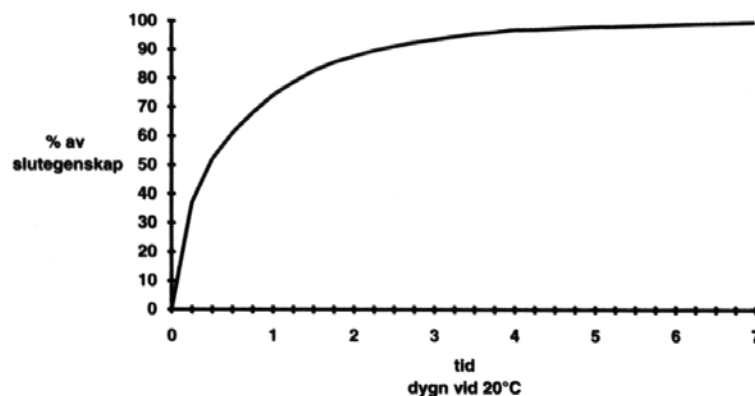
Härdningstid

Vissa lamineringsepoxityper kan accelereras för att snabbare härda men generellt går det inte styra härdningstiden i samma omfattning som för esterplasterna genom tillsatser.

Det förekommer istället olika epoxityper som är anpassade för att härda olika snabbt och härda vid olika temperatur beroende på användningsområdet.

Vanligast för privatpersoner och mindre komplex industriell tillverkning är att rumstemperaturhärdande lamineringsepoxi utnyttjas. Denna epoxityp är framtagen för att lamineras och härdas i rumstemperatur, kring 15-30°C.

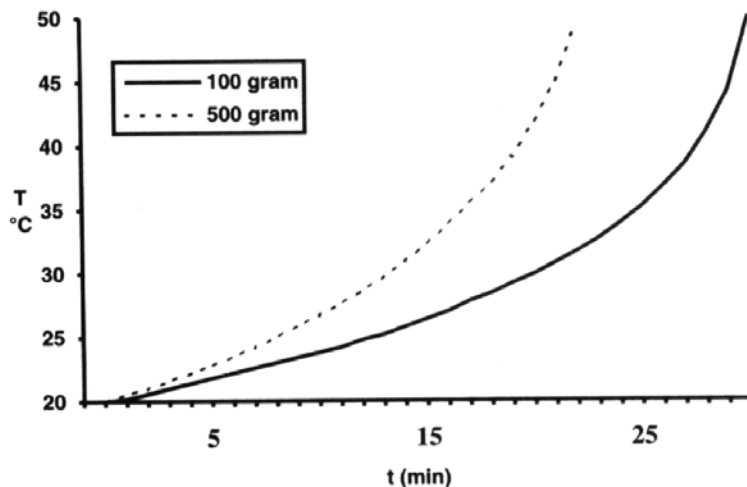
Härdningstiden, dvs den tid det tar innan laminatet är helt genomhärdat är vid rumstemperatur (+20°C) kring en vecka, medan 75% av slutegenskaperna har uppnåtts inom ett dygn, se kurvan nedan.



Exempel på härdningsförloppet för rumstemperaturhärdande lamineringsepoxi

Härdningstemperatur

Liksom för esterplasterna är epoxiplasternas härdningsförlopp en exoterm reaktion, dvs en kemiska härdreaktionen där molekylerna i epoxiplasten tvärbinds frigör värme. Beroende på hur snabbhärdande epoxin är och förhållandet mellan volymen och den avkylande ytan för den härdande epoxihartsen eller epoxilaminatet blir temperaturökningen olika hög och stiger olika snabbt, se kurvan nedan.



Exempel på temperaturökning vid härdande av rumstemperaturhärdande laminerings-epoxi i två kärl med 100 resp. 500 gram, där den omgivningen håller rumstemperatur

Därmed är det viktigt att både den tillblandade epoxihartsmängden vid laminering anpassas till epoxitypen, den omgivande temperaturen och hur snabbt epoxin skall tillföras laminatet. En för stor tillblandad mängd ger risk för att epoxihartsen härdar innan den har hunnit tillföras laminatet varvid outnyttjad mängd epoxiharts måste kasseras.

Värmehärdning

Den exoterma härdningsreaktionen för epoxi kan på samma sätt som för polyester och vinylester snabbas upp om den omgivande temperaturen kring den härdande epoxin höjs.

Reaktionshastigheten fördubblas generellt för varje tiotals grad som temperaturen höjs. Dvs en härdreaktion för epoxiharts går dubbelt så fort vid +30°C som vid +20°C, varvid härtiden minskar i samma omfattning.

För att snabba upp epoxilaminatets härdreaktion och därmed minska härtiden kan alltså den omgivande temperaturen medvetet höjas varvid laminatet värmehärdas. Värmehärdningen sker ofta i två steg, en lägre temperaturhöjning strax efter att väven har vätts klart men laminatet inte ännu är hårt för att ytterligare höja temperaturen i ett senare skede. Den förhöjda temperaturen medan epoxin är flytande minskar dess viskositet varvid epoxin bättre tillåts väta fibrerna och pressas ut om laminatet befinner sig under press (*tex vakuumbagging*). Temperaturhöjningen i det senare skedet tillåter molekylerna i epoxin att bättre tvärbinda varvid laminatet blir starkare, hårdare och får generellt längre brottöjning.

Vid värmehärdning höjs även laminatets **HDT** (*Heat Deflection Temperature*) dvs den temperatur där laminatet mjuknar och hållfastheten kraftigt minskar.

För rumstemperaturhärdande lamineringsepoxi kan en lämplig värmehärdningstemperatur vara först 50°C för att senare höjas till 70-120°C beroende epoxityp och fabrikat. Temperaturen anpassas även efter hur temperaturkänsligt eventuellt omgivande material, distansmaterial, hon- eller hanform mm är.

Observera att en för hög temperaturhöjning av ett härdande epoxilaminat som fortfarande är vått ger risk för att epoxin kokar eller luftinneslutningar i eventuellt distansmaterial expanderar varvid bla risken för luftinneslutningar i laminatet ökar.

Potlife

Potlife-tiden är ett mått på hur lång tid man har på sig vid lamineringsförfarandet, från epoxihartsen har blandats till, till epoxihartsen har härdat såpass att den inte längre kan påföras armeringsfibrerna och väta dessa. Tiden definieras vid rumstemperatur, +20°C, en bestämd mängd tillblandad epoxiharts (vanligtvis 100 gram), i ett kärl med en bestämd avkylande yta. För epoxikvalitéer med hög reaktivitet (kort potlife) som rumstemperaturhärdande och snabbhärdande epoxi definieras tiden då temperaturen för den tillblandade epoxihartsen har stigit från +20°C till +50°C. För epoxikvalitéer med låg reaktivitet (lång potlife) som epoxi enbart anpassad för värmehärdning definieras istället potlife-tiden till den tid det tar för epoxihartsens konsistens eller viskositet att fördubblas.

För rumstemperaturhärdande lamineringsepoxi är potlifen ofta kring en halvtimme till en timme.

Epoxityper

Beroende främst på vilken typ av härdare som utnyttjas till epoxihartsen (*olika typer av s.k. aminer*) åstadkoms olika epoxityper med olika egenskaper. En fördjupning i kemin kring detta är komplex och onödig för vanliga användare.

De större epoxitillverkarna producerar de lämpligaste epoxityper för fiberlaminering och det är istället upp till användaren att välja epoxityp utifrån ett antal olika grundförutsättningar:

- Härdningstemperatur – *skall laminatet härda i rumstemperatur eller med förhöjd temperatur?*
- Potlife – *hur lång tid tar lamineringen, genomförs lamineringen i rumstemperatur eller i ett rum med lägre temperatur?*
- Härdningstid – *är det viktigt att epoxilaminatet härdar snabbt, skall delar av laminatet tillåtas härda klart innan andra delar lamineras på?*
- HDT – *kommer laminatet utsättas för hög temperatur, är det tex ett mörkt färgat tunt enkellaminat som skall stå i solsen?*

Det förekommer tre grundtyper av lamineringsepoxi som bestäms utifrån i vilken temperatur epoxin bör härdas (typiska värden):

Epoxityp	Härdningstemperatur	Potlife (+20°C)	Härdningstid	HDT
Rumstemperaturhärdande	15-25°C värmehärdning: 50°C efterhärdning: 70-120°C	15 min – 2 h	1 vecka (+20°C) 2-10 h vid värmehärdning	40-70°C
Värmehärdande	50-180°C	24 h	1 h - 3 dygn (beroende på härdningstemperatur)	90-200°C
Snabbhärdande	10-25°C	1-10 min	2h – 1dygn	40-70°C

Rumstemperaturhärdande lamineringsepoxi används generellt vid laminering då inga specialkrav ställs. Värmehärdande lamineringsepoxi används där högre krav på hållfasthet och HDT ställs samt då laminat framställs industriellt då mycket hög lamineringstemperatur medger mycket kort härdningstid, där upphettade pressugnar kan utnyttjas.

Snabbhärdande lamineringsepoxi används främst vid laminering av små laminat, lokala lagningar och till lim eller spackel.

Rumstemperaturhärdande lamineringsepoxi kan ofta accelereras med en specialanpassad acceleratortillsats varvid härdningstiden vid rumstemperatur kan minskas till något dygn. Potlifen minskar i samma omfattning. Hållfasthetsvärdena förbättras något pga den högre utvecklade värmen vid den snabbare exoterma reaktionen.

Lösningsmedelsfri

De vanligaste epoxityperna för laminering är lösningsmedelsfria. Detta innebär att systemen är närmast luktfria och medger att man i viss omfattning kan laminera med epoxi även i dåligt ventilerade utrymmen och vanliga bostadsytor vilket ofta är till stor fördel för privatpersoner. Avsaknaden av lösningsmedel innebär även att epoxi kan utnyttjas vid laminering på känsliga ytor där polyester och vinylester löser upp underlaget, tex polystyrenskumplast (Frigolit™). Detta innebär att kostanden kan hållas nere vid byggande av formar men även vid sandwichkonstruktioner då polystyren ofta medger en prisvärt alternativ jämfört med andra skumplaster.

Allergiframkallande

Epoxiharts eller närmare bestämt härdartillsatsen till epoxihartsen kan vara allergiframkallande vid direkt hudkontakt. Vid långvarigt arbete med epoxi vidtas därför extraåtgärder där speciell skyddsutrustning utnyttjas. Vid mindre arbeten och enstaka lamineringsjobb med epoxi krävs dock generellt inte mer än enklare skyddande utrustning som skyddsvantar (förslagsvis vanliga diskvantar) och heltäckande klädsel.

Eventuellt spill på huden avlägsnas omedelbart med tvål och vatten, helst handrengöringsmedel som innehåller små fasta partiklar (plastkuler) som epoxihartsen kan fästa vid och som därefter spolas av.

Lösningemedel får inte användas vid rengöring av hud då lösningemedlet kan ta med epoxirester ner i huden varvid större fara för hudallergi uppstår.

Epoxilaminat får ej slipas eller sågas innan det är väl genomhärdat för att undvika att ohärdade epoxipartiklar andas in och hamnar i luftvägarna och lungorna där de kan framkalla en farlig allergireaktion.

Om ovanstående åtgärder uppfylls innebär arbete med epoxi normalt ingen säkerhetsrisk eller risk för hudallergi.

Epoxi som lim

Epoxi har de bästa limmande egenskaperna bland härdplasterna. Tvåkomponentslim är därför ofta baserade på epoxiplast. De goda limmande egenskaperna beror på den goda vätande förmågan (låg ytspänning) och liten krympning vid härdning.

Epoxins goda hållfasthetsvärden och vattentålighet ger även starka tåliga limfogar.

Generellt epoxilim, ofta snabbhärdande i tub, är vanligt där den kanske mest kända tillverkas av Araldit / Loctite. Dessa lim är ofta förtixtroperade, dvs har en trögflytande konsistens och har

ibland tillsätta färgämnen för att underlätta korrekt blandning. Dessa limmer är lämpliga vid mindre lagningar, mindre sammanfogningar av laminat och liknande arbeten.

För större limningar utnyttjas ofta istället lamineringsepoxi som tillförs förtjockningsmedel och därmed i större omfattning kan anpassas efter kraven vid den specifika limningen samtidigt som kostnaden blir lägre.

Det förekommer även spackel baserad på epoxi som utnyttjas där polyesterspackel inte är tillräckligt limmande eller extra hög vattentålighet krävs, bla för spackling under vattenlinjen på båtar.

Epoxi utnyttjas vid limning och spackling av trä, metall, hårdplast och termoplaster med hög ytspänning (ej ”hala” termoplaster med låg ytspänning som tex teflon eller polyeten).

Epoxitillverkare – tillverkare av lamineringspolyester och märken tillgängliga i mindre volymer på svenska marknaden:

- Epiglass / International
- Nils Malmgren (NM)
- SP Systems
- West System
- Araldit

3.4 Val av hårdplast

Valet av hårdplast vid laminering av fibrer är en kompromiss mellan ett antal faktorer där slutresultatet, dess utseende och kravet på dess egenskaper står i fokus samt i vilken miljö som den skall placeras i.

Ofta är även kostnaden en viktig faktor men även tidsåtgången.

I de flesta fall är polyester det självklara valet pga det låga priset men även det enkla lamineringsförfarandet och möjligheten att utnyttja kortfibrig glasfibermatta för att snabbt, enkelt och till en låg kostnad ta fram konstruktioner med tillräckliga hållfasthetsvärden och även med riktigt komplexa former.

Om kraven på de mekaniska egenskaperna för konstruktionen är högre kan valet istället falla på epoxi eller vinylester som istället för att armeras med fibermattor armeras med vävar, längsriktade fibrer och kanske med högprestandafibrer som kolfiber eller aramid. Det är viktigt att kontrollera att fibermaterialet är kompatibelt med den hårdplast som utnyttjas, dvs att fibern är sized för just den hårdplast som utnyttjas.

Kostnaden stiger, likaså komplexiteten och tidsåtgången, men om materialen utnyttjas rätt och effektivt kan materialåtgången minskas varvid kostnaderna inte behöver bli högre.

Privatpersoner har ofta inte tillgång till någon ventilerad lokal utan är nödgade att laminera i bostaden eller lokaler i direkt anslutning till bostaden (garage, förråd och liknande). Då kan det vara viktigt att den hårdplast som utnyttjas inte luktar allt för starkt och inte innehåller lösningsmedel vilket innebär att valet faller på lösningsmedelsfri lamineringsepoxi även om kostnaden är högre än för polyester eller vinylester.

För privatpersoner som enbart tillverkar mindre kompositkonstruktioner och utför mindre lagningar är även tillgången på hårdplast, armeringsfiber och kompositmaterial viktig. I mindre kvantiteter kanske bara den lokala handlaren endast saluför polyester och armeringsfiber såväl för polyester trots att kanske epoxi eller vinylester egentligen hade varit ett bättre val för den specifika konstruktionen. Att resa långa vägar eller skicka efter harts (som inte kan transporteras hur som helst) är då kanske omotiverat varför konstruktören nödgas kompromissa och anpassa konstruktionen efter de tillgängliga materialen.

Prisjämförelse

Cirka priser (år 2003) för lamineringshårdplast i mindre kvantitet 1-20kg:

Polyester: 35 – 120 kr/kg

Vinylester: 100 – 200 kr/kg

Epoxi: 180 – 400 kr/kg

Kommentar till prisjämförelsen:

Större kvantitet medför vanligtvis lägre kilopris. För de absolut minsta kvantiteterna är ofta kilopriset mycket högt, för att komma rimligt ner i pris behöver ofta kvantiteter om minst 5kg köpas.

Generellt är priset högt hos inköpskällor som enbart saluför små kvantiteter för privatpersoner och priset lägre hos inköpskällor som till största del saluför större kvantiteter för näringsidkare.

Vissa typer av hårdplast kan vara svåra att köpa i mindre kvantiteter, gäller främst vinylester, specialpolyester och värmehärdande lamineringsepoxi.

I stora kvantiteter (minst 20kg) är priset ungefär hälften av de angivna cirka priserna.

Priset på lamineringshårdplast följer råoljepriset.

4 Armeringsfibrer

Armeringsfibrernas syftet i en fiberkomposit är att armera matrisplasten, styva upp den, öka hållfastheten och de mekaniska egenskaperna.

Armeringsfibrer i sig är enbart mycket tunna trådar som inte kan ta upp någon annan last än ren dragbelastning. När dessa tunna trådar binds samman med en matrisplast fås en komposit som kan ta upp laster i alla riktningar och bildar därmed ett konstruktionsmaterial.

Uppbyggnad

Beroende på fibermaterial och kvalitet är vanligtvis armeringsfibrer för kompositlaminering uppbyggd av fiberknippen om 100-500 fibrer där varje fiber har en diameter kring 2-30 μm (1 μm (mikrometer) = 1/1000mm).

Tunnare fibrer innebär generellt att matrisplasten tillåts väta fibrerna bättre, och bättre binda dem vilket framför allt ger högre böj- och skjuvhållfasthetsegenskaper.

Fiberknippen kan antingen vara hårt sammanbundna till s.k. strand eller löst sammanbundna till s.k. roving, och i sin tur paras ihop i större knippen om vanligtvis totalt 1 000-24 000 fibrer.

De viktigaste egenskaperna för en armeringsfiber är:

- Goda mekaniska egenskaper, hög draghållfasthet och E-modul vid drag
- Goda möjligheter att vätas och bindas av matrisplasten
- Goda tryck-, böj- och skjuvhållfasthetsegenskaper i fiberkomposit, bunden med matris

Önskvärda egenskaper utöver de viktigaste egenskaperna är:

- Högt motstånd mot mekanisk påverkan, hög slaghållfasthet
- Högt motstånd mot yttre miljö främst UV-ljus, vatten och kemikalier

Tryck-, böj-, och skjuvhållfasthetsegenskaper

Eftersom armeringsfibern i sig endast kan ta upp dragbelastning, men sammanbunden med plast även kan ta upp tryck-, böj- och skjuvbelastning beror de senare hållfasthetsegenskaperna mer på hur fibrerna väts av matrisplasten och tillåter sig bindas samman än fibrernas rena hållfasthetsegenskaper.

Det är därför mycket svårare att utifrån kunskaper av armeringsfibrernas hållfasthetsegenskaper beräkna fiberkompositens tryck-, skjuv- och böjhållfasthetsegenskaper jämfört med fiberkompositens hållfasthetsegenskaper än vid rent dragande belastning.

Sizing

Armeringsfibrer ytbehandlas ofta. Denna ytbehandling kallas sizing. Syftet med ytbehandlingen är att öka matrisplastens vätnad och bindande förmåga av fibrerna men även för att skydda armeringsfibern mot nötning. Ytbehandlingen skiljer mellan vilken härdplast som fibern skall lamineras med, man säger att fibern är sizad för polyester, vinylester eller epoxi. Om man tex laminerar en fiber som är sizad för polyester (som innehåller lösningsmedlet styren) med epoxi (som vanligtvis är lösningsmedelsfri) är det sannolikt att fiberlaminatets hållfasthet blir sämre än om fibrer sizade för epoxi hade utnyttjats.

Det förekommer ett antal olika fibrer som utnyttjas för att armera plast, de vanligt förekommande armeringsfibrer:

- **Glasfiber**
- **Kolfiber**
- **Aramid**

Termoplastfibrer:

- **Polyester** / Terylene™
- **Nylon**
- **Dyneema™** / Spectra™

Naturfibrer

Specialfibrer

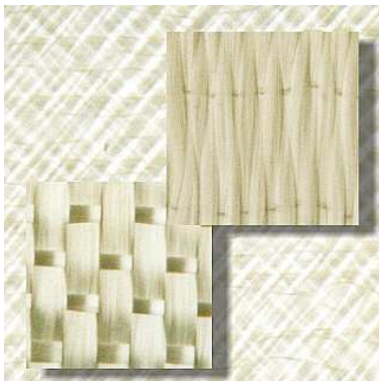
Översikt – fibrer för armering av hårdplast:

Fiber	Användningsområden	Fördelar	Nackdelar
Glasfiber (E-glas)	Generellt till alla typer av tillämpningar både som armering i termoplaster och hårdplaster. Allt ifrån priskänsliga lågprestandatillämpningar, i form av huggen korttrådig armering och hög plasthalt (polyester) till relativt högprestandakrävande tillämpningar med vävar och vinylester eller epoxi som matris i kombination med sandwichuppbbyggnad. Marina tillämpningar, båtar, fordonsindustrin, byggindustrin.	+ Lågt pris + Finns i många former och utföranden, enkel att köpa i mindre kvantiteter + Elektriskt isolerande + Förhållandevis hög draghållfasthet + Enkel att laminera, lätt att se då väven är genomvätt	- Låg styvhet (låg E-modul) - Hög densitet - Stickande slipdamm
Kolfiber	Tillämpningar som kräver hög styvhet och styrka i förhållande till vikten men där priset är underordnat. Hela högprestanda konstruktioner och lokala förstärkningar av glasfiberlaminat. Oftast med epoxi eller vinylester som matris. Flyg och rymdindustrin, militärindustrin, sportartiklar (cyklar, racket, klubbor, spön mm).	+ Hög styvhet + Hög draghållfasthet + Hög utmattningsbeständighet + Attraktivt utseende	- Högt pris - Dålig slagåtlighet - Sprött, kort sträckgräns - Elektriskt ledande, bildar galvaniskt element vid kontakt med metaller
Aramid	Tillämpningar som kräver hög slagåtlighet men även hög draghållfasthet i förhållande till vikten, ofta tillsammans med kolfiber för att skydda laminat. Skottsäkra (ballistiska) laminat och förstärkningar. Främst militärindustrin, flyg och rymdindustrin.	+ Hög slagåtlighet + Hög rivstyrka + Låg densitet	- Högt pris - Dålig UV-tålighet, mörknar och bryts ner vid exponering av solljus - Låg tryck- och böjåtlighet pga begränsad vätning för matrisen
Polyester/ Terylene™	Tillämpningar där styvheten hos laminatet är underordnat, utan där ett segt slagåtligt laminat prioriteras. Även till ytmattor i glasfiberbaserade laminat där hög ytjämnhet och skydd om yttre miljö och kemikalier krävs. Främst båtar och tankar.	+ Hög slagåtlighet, ger ett laminat som flexar undan vid slag + Lågt pris + Kemikalieskyddande	- Mycket låg styvhet (låg E-modul)
Dyneema™/ Spectra™	Utnyttjas i lamineringssammanhang endast i specialfall då kravet på slagåtlighet är mycket hög men den dåliga vätande förmågan inte påverkar konstruktionen. Skottsäkra (ballistiska) speciallaminat, uppfångande förstärkningar.	+ Hög slagåtlighet + Hög rivstyrka + Låg densitet (lättare än vatten = flyter) + Hög draghållfasthet	- Mycket dålig vätning, nästintill omöjlig att utnyttja i laminatsammanhang - Sträcks vid kontinuerlig belastning - Högt pris - Svår att få tag i för lamineringsbruk

Översikt – fysiska egenskaper för de vanligaste fibrerna för armering av hårdplast:
3= bäst, 2=medel, 1=sämst

Egenskap	Glasfiber (E-glas)	Kolfiber (HS-kvalité)	Aramid (Kevlar 49)
Draghållfasthet	2	3	2
E-modul, drag	1	3	2
Tryckhållfasthet	2	3	1
E-modul, tryck	1	3	2
Böjhållfasthet	2	3	1
E-modul, böj	1	3	2
Slaghållfasthet	2	1	3
Spjälkhållfasthet, tvärs laminatet	3	3	2
Spjälkhållfasthet, i laminatets plan	3	3	2
Densitet	1	2	3
Utmattningsbeständighet	1	3	2
UV-tålighet	3	3	1
Motstånd mot brand	3	1	3
Värmeisolering	2	1	3
Elektrisk isolering	3	1	2
Temperaturutvidgning	2	3	2
Kostnad	3	1	1

4.1 Glasfiber



Glasfiber tillverkas genom att glas i smält form dras ut till långa fibrer.

Glasfiber är den i särklass vanligaste armeringsfibern för armerade plaster. Priset är lågt, användningsområdena många och fibern finns att tillgå i många olika former för kompositlaminering. Glasfiber kan utnyttjas med alla typer av lamineringshårdplaster men även termoplaster, efter att fibern har sizats (ytbehandlats) efter den plast den skall armera.

Pga armeringsplasterna tillåts väta och binda samman glasfibrerna väl tål glasfiberlaminat tryckbelastning i ungefär samma omfattning som dragbelastning.

Glasfibers densitet (kring $2,6 \text{ kg/dm}^3$) är i förhållande till andra armeringsfibrer relativt hög.

Glasfiber finns i olika kvalitéer beroende på ingående beståndsdelar i ursprungsglasets, framställningssätt och användningsområde:

4.1.1 E-glas

E-glas är den i särklass vanligaste glasfiberkvalitén. Beteckningsbokstaven *E* kommer från början från att E-glasfibrer är elektriskt isolerande och utnyttjades för denna egenskap men det låga priset i förhållande till E-glasfiberns mekaniska prestanda gjorde att E-glasfibern, sedan man upptäckte att den var lämplig för att armera plaster med, snabbt blev spridd.

Dragstyrkan för rena E-glasfibrer (olaminerad) är relativt hög: kring 3400MPa, inte långt under billigare kolfiberkvalitéer. Men eftersom E-glas har en hög töjbarhet: ca 4,5% töjgräns vid brott blir E-modulen relativt låg: ca 75GPa.

Observera att glasfiberkompositlaminat ofta har hållfasthetsvärden långt under vad som kan tyckas möjligt om man enbart ser till E-glasfiberns egenskaper. Detta beror på att glasfiberlaminat i sin vanligaste form armeras med matta av korthuggen E-glas där fibrerna är slumpmässigt placerade i alla riktningar och fiberhalten är låg (kring 30%).

E-glasfibrer för laminering håller ofta lägre kvalitet även i roving eller matta där fibrerna i teorin kan vara oändligt långa vilket innebär bla att varje enskild fiber är kortare än idealfallet. Detta medför att främst dragstyrkan och töjbarheten för dessa fibrer är lägre än för högkvalitativa E-glasfibrer. I praktiken är ofta dragstyrkan för dessa fibrer kring 2000MPa och töjgränsen kring 3,5%.

4.1.2 S-glas

S-glas är beteckningen på en glasfiberkvalité med bättre draghållfasthet än E-glas. Andra beteckningar på glasfiber med liknande egenskaper är **R-glas** och **T-glas**. Draghållfastheten, kring 4400GPa är i klass med kolfiber men E-modulen är nästan lika låg som för E-glasfibrer, kring 85MPa. Detta innebär att S-glas har hög töjbarhet: ca 5,5% töjgräns vid brott. Detta gör att S-glas är lämpligt som armering i kompositlaminat där man eftersträvar hög töjbarhet i kombination med hög hållfasthet.

Priset på S-glas, R-glas och T-glas är lika högt pris som för billigare kolfiberkvalitéer men tillgängligheten i mindre kvalitéer är sämre.

4.1.3 C-glas

C-glas är en glasfiberkvalité med extra hög resistens mot kemikalier och vatten. Fibern återfinns främst i ytmattor som utnyttjas för att ge laminat, oftast armerade med E-glas, ett bättre skydd mot kemikalier och fukt. Ytmattan lamineras då som yttersta skiktet mot laminatets utsida eller mot laminatets gelcoatlager.

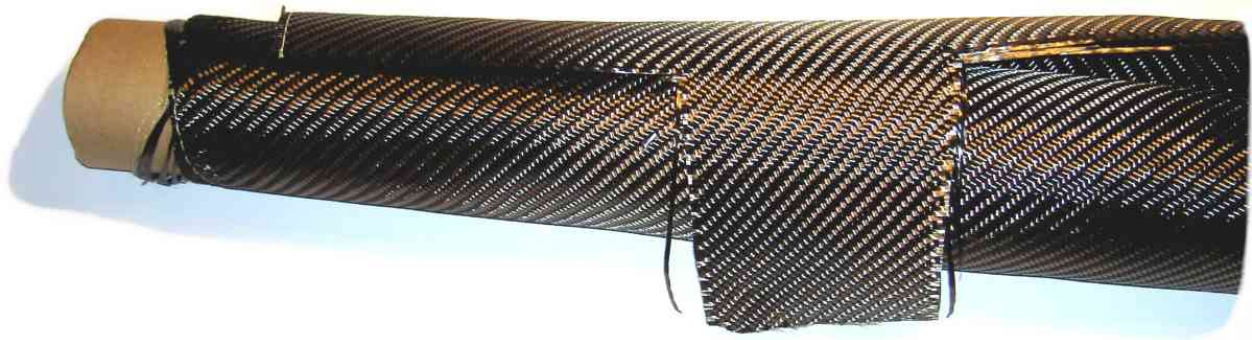
4.1.4 Specialglasfiber

Det finns ett antal specialkvalitéer av glasfiber. Dessa är ofta framtagna för att uppfylla ett speciellt behov eller för att ge kompositlaminat bättre egenskaper än vad främst E-glas kan ge. Priset är generellt högt på dessa fibrer och tillgängligheten låg.

Exempel på olika specialglasfiber:

- **Quartsglas** – goda hållfasthetsegenskaper och mycket hög värmestålighet
- **L-glas** – används som strålskydd, hög blyhalt
- **M-glas** – konkurrerar med högmodulfibrer som kolfiber och aramidfiber
- **D-glas** – lägre densitet än E-glas men sämre hållfasthetsegenskaper

4.2 Kolfiber



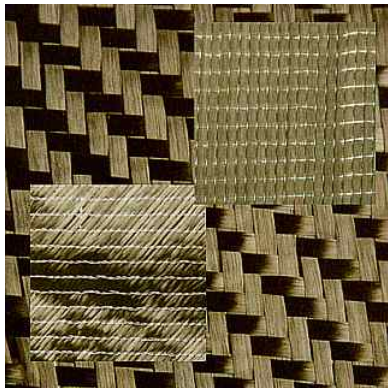
Kolfiberväv 650gr/m² 2x2-twill, Toray T-300

Kolfiber kallas även kallat **grafitfiber** eller mindre korrekt carbon eller karbon från engelskans *carbon fibre*.

Karakteristik

Fiberkomposit armerade med kolfiber karakteriseras av mycket hög styvhet och hög hållfasthet. Kolfiber väts och binds mycket bra av tex hårdplasten epoxi vilket gör att fiberns draghållfasthetsegenskaper även kommer till sin rätta vid böj och tryck. Tryckhållfastheten och E-modulen vid tryck är generellt i samma nivå som draghållfastheten och E-modulen vid drag för ett epoxi-kolfiber-laminat förutsatt att laminatet inte utsätts för så hög temperatur att epoxin mjuknar (över laminatets HDT-värde).

Rätt utnyttjad är kolfiberarmerad epoxi, i förhållande till sin vikt, det styvaste och starkaste konstruktionsmaterialet som finns!



Kolfiber i laminat

Eftersom kolfiber har kort töjgräns, mellan 0,7% och 2,2%, beroende på kvalité är kolfiberkomposit generellt spröda. Fiber materialet går av tvärt utan förvarning vilket gör det svårt för en oerfaren konstruktör att utnyttja kolfiberns maximala prestanda genom att minimera materialet och därmed vikten (och kostnaden). Konstruktören är istället ofta nödgad att överdimensionera vid framtagande av rena kolfiberkonstruktioner.

Kolfiber används ofta i kombination med glasfiber och aramid för att öka styvheten och styrkan i konstruktioner med lokala

förstärkningar. På detta sätt kan kolfiber ge en lättare, styvare och starkare konstruktion utan omotiverad ökad kostnad.

Vid lokala förstärkningar är det oftast mest praktiskt att utnyttja längsriktat kolfiberband.

Galvaniska problem

Kolfiber är elektriskt ledande, och har en elektronegativitet som avviker från många metaller. Detta kan innebära att om ett kolfiberlaminat kommer i direkt kontakt med en metall som är mer oädel (tex aluminium eller stål) kan galvaniskt element uppstå där metallen oxiderar varvid laminatet riskerar släppa från metallen.

Den enklaste sättet att undvika problem av detta slag är att laminera på en elektriskt isolerande väv vanligtvis av E-glasfiber mellan kolfibern och metallen.



Kolfiber för utseendet

Kolfibers optiska täthet och färg som skiftar mellan grafitgrå och svart i laminat med mattor laminerade med optiskt klara härdplaster (vanligtvis epoxi) ger ett karakteristiskt 3D-utseende. Utseendet anses exklusivt och symboliserar "Hi-Tech" varför kolfiber under senare år i stor utsträckning har börjat utnyttjas mer för utseendet än för den mekaniska prestandan.

Kolfiberklassningar

Genom olika tillverkningsprocesser är det möjligt att styra kolfibers hållfasthetsegenskaper.

Beroende på E-modulen (vid drag) för kolfibern sorteras den in under olika kvalitetsklasser. Dessa olika kolfiberkvaliteter har olika användningsområden beroende på om hög styrka, hög styvhet eller lågt prisförhållande är den

viktigaste egenskapen för kompositlaminatet eller vid den lokala förstärkningen.

Priset på fibrerna är generellt stigande med högre E-modul.

Kvalitetsklassningarna för kolfiber:

4.2.1 Standard

Standard-kvalité är den vanligaste kolfiberkvaliteten.

Denna oftast återfinns i "finish-tillämpningar", där man främst utnyttjar kolfibern för dess optiska täthet och det mönster den ger i laminat med optiskt klara matriser.

Därför finner man ofta kolfiber av standardkvalité i draperbara vävar, ofta twillvävar vilket ger det karakteristiska kolfiberutseendet som bla utnyttjas i mer exklusiva motorcykeldetaljer och bilinredning.

4.2.2 HS – High Strength

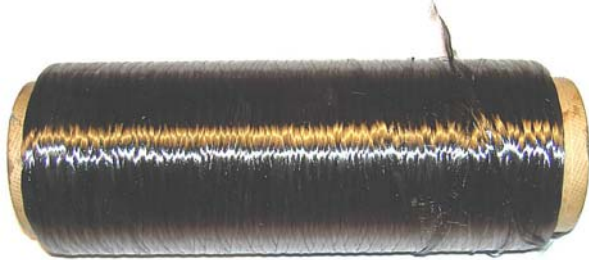
Kolfiber som faller in under kvalitetsbeteckningen HS: *High Strength* - hög styrka har en E-modul (drag) under 265GPa. Gränsen mellan kolfiber av HS-kvalité och standardkvalité flyter samman, men ibland klassas kolfiber med en draghållfasthet över 4000MPa som HS-kolfiber medan kolfiber med samma E-modul men lägre dragstyrka klassas som kolfiber av standardkvalité.

Men för att betona att även kolfiber av standardkvalité har en förhållandevis hög draghållfasthet jämfört med andra fibrer betecknas de trots klassningsbestämningarna ofta som HS-kolfiber.

4.2.3 IM – Intermediate Modulus

Kvalitetsbeteckningen IM betyder *Intermediate Modulus – mellan hög E-modul*. Kolfiber med E-moduler (drag) mellan 265GPa och 320GPa faller in under denna klassning.

IM-kolfiber är en kompromiss mellan hög E-modul och förhållandevis lång sträckgräns (typiskt sträckgräns: 1,3-2,2%) vilket innebär att de starkaste kolfiberkvalitéerna betecknas med denna klassning, bla Torays kolfiberkvalité T1000G med en draghållfasthet för fibern på 6370GPa vilken är den starkaste kolfiberkvalitén som finns tillgänglig på marknaden.



Rovingrulle med Toray T1000G, IM-kolfiber (rovingstorlek: K12)

4.2.4 HM – High Modulus

Kolfiber som faller in under kvalitetsbeteckningen *HM: High Modulus – Hög E-modul* har en E-modul (drag) mellan 320GPa och 440GPa. Dragstyrkan är ungefär den samma som för Standard- eller HS-kolfiber men med lägre sträckgräns (typisk sträckgräns: 0,7-1,4%) är E-modulen för fibern hög.

Kompositaminat armerade med HM-kolfiber blir styva men mycket spröda.

4.2.5 UHM – Ultra High Modulus

Kvalitetsbeteckningen UHM betyder *Ultra High Modulus – extremt hög E-modul*. Kolfiber med denna kvalitetsbeteckning har en E-modul (drag) för rena fibern på mer än 440GPa. Dragstyrkan är ungefär den samma som för HS-kolfiber men UHM-kolfiber har mycket kort sträckgräns vid brott: typisk sträckgräns är 0,7-1,0%.

Detta innebär att kompositlaminat armerade med UHM-fibrer är mycket styva men samtidigt mycket spröda.

UHM-kolfiber utnyttjas i specialtillämpningar där styvheten är av högsta betydelse men kompositkonstruktionen inte böjs eller sträcks i någon större omfattning.

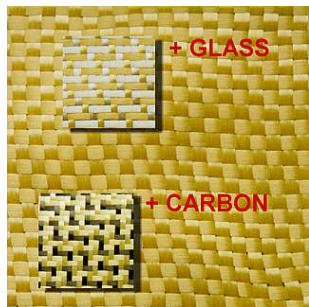
4.2.6 Kolfiberjämförelse

Kolfibersammanställning - Typiska egenskaper för kolfiber inom olika kvalitetsklassningar
För fullständig sammanställning över kolfiberkvalitéer av olika fabrikat se sidan 95

Kvalitetsklass	Standard	HS	IM	HM	UHM
E-modul, drag	<265 GPa	<265 GPa	265–320 GPa	320–440 GPa	>440 GPa
Draghållfasthet (typisk)	3200-4000 MPa	4000–5000 MPa	3900–6400 MPa	2700-5200 MPa	3400-4900 MPa
Sträckgräns (typisk)	1,2-1,7%	1,6-2,1%	1,3-2,2%	0,7-1,4%	0,7-1,0%
Densitet	1,77 kg/dm ³	1,80 kg/dm ³	1,77 kg/dm ³	1,77 kg/dm ³	1,93 kg/dm ³

4.3 Aramid

Aramidfiber är för många kända som **Kevlar™**. Kevlar är dock enbart handelsnamnet för aramidfibrer tillverkade av DuPont och det finns andra tillverkare av aramidfibrer med andra handelsnamn.



Karakteristik

Fibern känns lätt igen för sin gyllengula färg. Dess främsta positiva egenskap i kompositsammanhang är att den har hög rivstyrka och har hög energiupptagning vid slag. Detta gör att kompositlaminat armerade med aramidfibrer blir slag- och skärtåliga. Tjocka aramidlaminat utnyttjas för ballistiska ändamål, i bl.a skottsäkra paneler. I tunnare laminat eller som skyddsskikt i laminat med kolfiber eller glasfiber som huvudarmering utnyttjas kevlarfibrer för att hålla ihop laminat vid slag

så att laminatet inte splittras även om de övriga fibrerna brister.

Aramidfibrer har även en hög hållfasthet jämfört med vikten, likvärdigt med många kolfiberkvalitéer. Men eftersom aramidfibrer har längre brottöjning än kolfiber är E-modulen vid drag lägre.

Problem

Armeringsplaster kan inte väta och binda aramidfibrer i lika stor utsträckning som glas- eller kolfiber varför tryck- och böj hållfastheten för aramidlaminat är relativt låg. Vid dessa belastningar håller väven fortfarande ihop men laminatet delaminerar och platen släpper från aramidfibrerna.

Vid slipning av laminerad aramidväv skrapas matrisplasten bort medan aramidväven blir kvar vilket gör att det är nödvändigt att antingen laminera på extra plast, spackel eller något lager med glasfiberväv vid slipning av laminat med aramidväv ytterst.

Aramidfiberns stora skärmotstånd gör även att verktyg slits snabbt både när aramidväven skall klippas eller skäras till innan laminering eller vid kapning av laminat med aramidfibrer i.

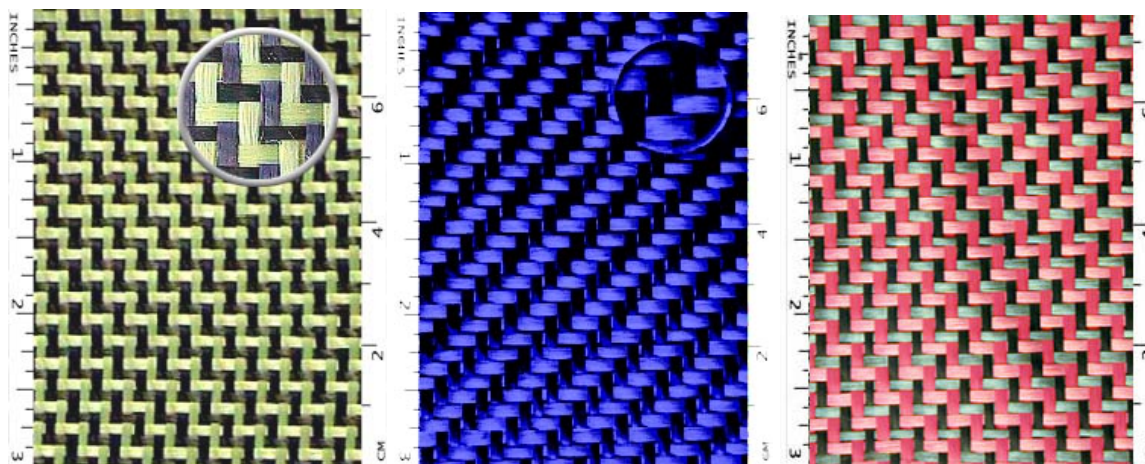
Aramidfibrer är känsliga för UV-ljus, de mekaniska egenskaperna försämras vid långvarig exponering utan skydd samtidigt som färgen mörknar.

Exempel på några aramidfibrer:

- **Kevlar™ 29**
- **Kevlar™ 49**
- **Kevlar™ 149**
- **Twaron™**
- **Technora™**

Kevlar™ tillverkas av amerikanska DuPont, som också är uppfinnare av aramid (1965). För lamineringssändamål finns tre huvudkvaliteter: Kevlar 29, 49 och 149. Högre nummer innebär högre E-modul (drag) och högre pris. Kevlar 49 är den vanligaste i lamineringssammanhang. Denna aramid är en s.k. HM-kvalité, där HM står för *High Modulus*.

Kevlar färgas även i olika färger för att i kombinationsvävar med kolfiber bli mer dekorativa.



Kombinationsvävar: Kevlar / kolfiber (2x2-twillvävning 196gr/m²) ofärgad, blåfärgad och rödfärgad Kevlar

Twaron™ och **Technora™** är tillverkade av Japanska Teijin eller av deras underföretag och är olika varianter på aramidfibrer med olika molekylstruktur och olika egenskaper. Dessa finns i olika kvaliteter med olika mekaniska prestanda.

Technora finns tex i en kvalité som har färgats svart: Technora black. Detta för att aramidfibern inte lika snabbt skall brytas ner vid exponering av solljus (UV-strålning).

Teijinconex™ är en annan fiber tillverkad av Teijin som faller in under gruppen aramidfibrer. Fiberns främsta egenskap är extrem värmetålighet (tål upp till 400°) men fibern har annars dåliga mekaniska egenskaper jämfört med andra aramidfibrer. De mekaniska egenskaperna är istället jämförbara med polyesterfibers.

4.3.1 Aramidjämförelse

På samma sätt som med olika kolfiberkvaliteter så delas aramidfibrer upp i olika kvalitetsklasser beroende på E-modulen vid drag för fibern.

Kvalitetsklassningarna för aramidfibrer är:

- LM – Low Modulus – Låg E-modul (drag), *tex Kevlar 29*
- HM – High Modulus – Hög E-modul (drag) *tex Kevlar 49*
- UHM – Ultra High Modulus – Extremt hög E-modul (drag) *tex Kevlar 149*

Aramidjämförelse – olika kvalitetsklasser för aramidfibrer

Kvalitetsklass	LM	HM	UHM
E-modul, drag (typisk)	40 GPa	120 GPa	180 GPa
Draghållfasthet (typisk)	3600 MPa	3100 Mpa	3400 MPa
Sträckgräns (typisk)	8,8%	2,6%	1,9%
Densitet	1,45 kg/dm ³	1,45 kg/dm ³	1,47 kg/dm ³

Som armeringsfiber vid kompositlaminering är de vanligaste förekommande aramidfibrerna av HM-kvalité.

4.4 Termoplastfibrer

Termoplastfibrer avser armeringsfibrer baserade på termoplaster. Dessa återfinns förutom i kompositsammanhang ofta i linor och band.

Karakteristik

Fibrer baserade på termoplaster, lämpliga för kompositlaminering är sega och har lång brottöjning. Vid armering av hårdplaster används därför dessa fibrer för att ge ett slagåligt segt laminat. Termoplastvävar kan även vävas mycket jämna och täta vilket tillsammans med fibrernas kemikalietålighet gör att de även utnyttjas till s.k. ytmattor, ytterst i laminat eller närmst laminatets gelcoatlayer för att öka kemikalietåligheten och minimera risken för att fiberstrukturen syns igenom gelcoaten.

Exempel på termoplastbaserade fibrer som utnyttjas vid laminering:

- **Polyester / Terylene™**
- **Nylon** (polyamid)

Både nylon och polyester är mycket vanliga som fibermaterial i linor. Fibrerna är flexibla och brottstyrkan hög samt priset förhållandevis lågt vilket gör dem lämpliga för detta ändamål. Polyester är dessutom mycket UV-tålig i förhållande till de flesta andra termoplastfibrer. Brottöjningen för polyesterfibrer är ca 10% medan nylon sträcks ända upp till 30% innan brott. Terylene är handelsnamnet för en vanligt förekommande polyesterfiber för kompositlaminering, främst i vävar.

Problem

Termoplastvävar är relativt svåra att väta vid laminering och det är viktigt att fibrerna är sizade för den plast som de skall lamineras med, dvs att de är ytbehandlade för att plasten bättre skall kunna tränga in i fibrerna och binda dessa samman.

Av denna anledning är det tex omöjligt att utnyttja segelmaterial som är baserat på polyesterfibrer (Dacron™), eller nylonväv (spinackerväv) som armeringsväv i fiberkompositlaminat. Dessa vävar är behandlade för att de inte skall suga upp vatten eller fukt vilket vanligtvis även betyder att de inte tillåts vätas av lamineringsplast (polyester, vinylester eller epoxi).

Då ett laminat armerat med polyester- eller nylonfibrer slipas stannar fibern kvar medan plasten slipas bort på samma sätt som vid slipning av ett aramidlaminat.



FOTO: Liz Holmqvist

Sven Yrvind (tidigare Sven Lundin) har byggt flera segelbåtar med namn **Bris**. Långfärdsbåtar med mycket små mått som han har korsat oceaner med. Skroven på de senare båtarna är konstruerade i sandwichlaminat och som yttre laminatsida terylene-armerad epoxi. Sandwichkonstruktionen (med 50mm Divinycell™ som kärnmateriäl) står för styvheten medan det väl tilltagna terylene-epoxi-laminatet är mycket flexibelt och slagttåligt. Detta har bevisats av att Bris-båtarna har klarat många stormar och tom krokar i hög fart utan några skador.

4.5 Dyneema

Dyneema är en termoplastbaserad fiber som även saluförs under varumärkesnamnet Spectra.

Detta fibermaterial har under senare år till stor del tagit över aramidfibrernas plats som material för högprestandalinor som är extra starka med låg töjning. Dyneema är mindre känsligt mot UV-ljus och fukt än aramid samt linor av Dyneema tål skarpa böjar tex i knutar eller över block.

Hos linor av Dyneemafibrer är i princip den enda nackdelen mot aramidfibern att Dyneemafibrer sträcks om de belastas under lång tid.



Dyneemavävar, 150gr/m² (ovan) och 80gr/m² (under)

Karakteristik

Dyneemafibrer är ett av de starkaste fibermaterialen på jorden jämfört med den låga densiteten (strax under 1kg/dm³). Med en töjning på ca 3% vid brott är även E-modulen vid drag hög. Fibern är dessutom mycket svår att skära av och är en bra energiupptagare vid slag vilket gör att Dyneemafibrer används till ballistiska ändamål som skottsäkra västar.

Problem

Det låter som om Dyneema borde vara den perfekta fibern som armeringsfiber i kompositlaminat, men det är den inte! Dyneemafibrer är nämligen mycket svåra att vata och därmed har lamineringsplasten svårt att binda fibrerna i fiberkompositer. Detta innebär att ett kompositlaminat baserat på Dyneemavävar lätt delaminerar vid spjälkande belastning och att laminatets böjhållfasthet och tryckhållfasthet blir låg.

4.6 Naturfibrer

I vissa sammanhang utnyttjas naturfibrer som armering av hårdplaster, det handlar då om lågprestandalaminat där kraven på hållfastheten är låga. Ofta används istället naturfibrer som förtjockningsmedel eller fyllmedel för plasten vid limning, spackling och ljutning.

Exempel på naturfibrer som utnyttjas i hårdplastkompositer är:

- **Bomull**
- **Cellulosa**
- **Lin**
- **Hampa**

4.7 Specialfibrer

Det förekommer olika specialfibrer för armering av hårdplaster. Dessa är ofta framtagna för att uppfylla ett speciellt behov, men priset är oftast mycket högt varför användningen är starkt begränsad.

Bor- och kiselkarbamidfibrer

Dessa specialfibrer har jämförbara mekaniska egenskaper med kolfiber men kan kombineras med metaller utan risk för att galvaniskt element uppstår. De har även hög värmestålighet. Priset är dock mycket högt. Den främsta användningen är inom rymdindustrin.

Keramiska fibrer

Det finns flera olika typer av keramiska fibrer. Dessa används främst för att öka värmetåligheten i kompositlaminat där detta krävs. Även dessa används främst inom rymdindustrin.

4.8 Val av armeringsfiber

Eftersom armeringsfibrerna till största del bestämmer de mekaniske egenskaperna för en fiberkompositkonstruktion är valet centralt om specifika mekaniska egenskaper krävs av konstruktionen.

Ofta är dock kraven inte så specifika och möjlighet finns att överdimensionera. I dessa fall är ofta det självklara valet av armeringsfiber vanlig glasfiber (E-glas), ofta i form av korthuggen matta laminerad med polyester. Detta ger ett mångsidigt, billigt laminat som går snabbt att ta fram och inte kräver några specialkunskaper.

Dessa fibrer är även ofta det självklara valet vid de reparationer som kan komma till fråga av båtskrov och liknande.

Även när kraven på mekaniska egenskaper är mer specifika är valet av armeringsfibrer ofta E-glas, men då i form av matta eller längsriktade fibrer, kanske laminerade med hårdplaster som ger bättre mekanisk prestanda som epoxi eller vinylester. Viktigt är dock att fibrerna är sızade för den plast som de lamineras med.

Det är dessutom ofta bättre att anpassa konstruktionens utformning än att välja dyrare fibrer med bättre prestanda, tex välja att konstruera med sandwichlaminat istället för enkellaminat för att öka konstruktionens styvhet.

Vid fiberkompositkonstruktioner där antingen kraven på låg vikt eller hög styvhet är höga eller speciella mekaniska egenskaper på vissa platser i konstruktionen krävs så kan glasfibern antingen förstärkas med främst kolfiber eller fiberkompositkonstruktionen helt baseras på kolfiber.

I de flesta fall handlar det då enbart om billigare standardkolfiber eller kolfiber av HS-kvalité då priset för kolfiberkvalitéer med högre E-modul är avsevärt högre och tillgängligheten i små volymer är låg.

Endast vid konstruktioner där minimal vikt eller maximal styvhet krävs väljer privatpersoner eller mindre industrier att armera med styvare kolfiberkvalitéer.

Då krav på hög slagtålighet hos fiberkompositkonstruktionen finns kan glasfibern och eventuell kolfiber kompletteras med aramidfibrer, då ofta matta baserad på Kevlar 49-fibrer.

Alternativet att överdimensionera konstruktionen med mer glasfiberlaminat, anpassa formen eller välja mer flexibla polyesterfibrer i kombination med en sandwichkonstruktion kan dock ge ett billigare laminat med minst lika hög slaghållfasthet.

Oavsett vilka armeringsfibrer som är optimala i konstruktionen så är privatpersoner som endast tar fram mindre konstruktioner och utför mindre lagningar ofta nödgade att anpassa sig efter vad som finns tillgängligt i mindre volymer. Armeringsfibrer är visserligen avsevärt enklare att transportera eller skicka via post än harts men ofta blir kostnaderna inklusive tillskärningsavgifter och frakt omotiverat höga vid distansköp. Vissa armeringsfibrer som specialvarianter av glasfiber, aramid och kolfiber omsätter dessutom för små volymer i Sverige för att finnas

tillgänglig i mindre volymer på den svenska marknaden, utan måste i dessa fall beställas från utlandet till högre kostnader. I och med Internets spridning är detta dock numera relativt enkelt varvid möjligheterna att ta fram mindre specialanpassade fiberkompositkonstruktioner för privatpersoner och mindre industrier har ökat avsevärt.

Prisjämförelse

Cirkapriser (år 2003) på armeringsfibrer i mindre kvantitet (1-10m²):

Glasfiber:

E-glas – korthuggen matta, 450gr/m²: 50 kr/m², 110 kr/kg

E-glas – rowingväv, 600gr/m²: 50 kr/m², 80 kr/kg

E-glas – garnväv, 300gr/m²: 60 kr/m², 200 kr/kg

C-glas – ytmatta, 22gr/m²: 15 kr/m², 700kr/kg

S-glas, längsriktad: 250kr/kg

Kolfiber:

Standard-kvalité – T300, väv, 200gr/m²: 270 kr/m², 900 kr/kg

HS-kvalité – T700, längsriktad 300gr/m²: 250 kr/m², 830 kr/kg

MH-kvalité, längsriktad: 2500kr/kg

Aramid:

LH-kvalité – Kevlar 29, väv: 1000 kr/kg

HM-kvalité – Kevlar 49, 175gr/m²: 300kr/m², 1700 kr/kg

UHM-kvalité – Kevlar 149, längsriktad: 3000 kr/kg

Polyester – Terylene, väv, 170gr/m²: 60 kr/m², 350kr/kg

Dyneema, väv, 150gr/m²: 300 kr/m², 2000 kr/kg

Kombinationsväv:

Kolfiber / aramid – T300 / Kevlar 49, 205 gr/m²: 375kr/m², 1900kr/kg

Kommentar till prisjämförelsen:

Priserna skiljer kraftigt mellan olika inköpskällor, speciellt på ovanligare armeringsfibrer. Generellt är priset högt hos inköpskällor som enbart saluför små kvantiteter för privatpersoner och priset är lägre hos inköpskällor som saluför större kvantiteter för näringsidkare.

Vissa fibrer är ovanliga (tex S-glas, UMH-aramid, HM-kolfiber och Dyneema) och säljs med undantag enbart i stora kvantiteter (minst 10-100m²)

I stora kvantiteter (hela rullar eller förpackningar, minst 10-100 m²) är priset ungefär hälften av de angivna cirkapriserna.

5 Fibrernas form vid laminering

Fibrerna som utnyttjas vid laminering för att armera plasten i en fiberkomposit finns i olika utformningar beroende armeringsfibern, lamineringsplasten som skall nyttjas som matris, lamineringsmetoden, formen och den blivande konstruktionens utformning, krav på mekanisk prestanda, hållfasthetskrav osv.

Eftersom det inte bara är fibern och matrisplasten som bestämmer fiberkompositkonstruktioners mekaniska egenskaper utan även fibrernas riktning och längd på olika ställen i konstruktionen så är fibrernas utformning vid laminering ofta avgörande för konstruktionens slutgiltiga mekaniska prestanda.

Men valet av fiberform vid laminering är ofta en kompromiss där konstruktionens utformning och den lamineringsmetod som skall utnyttjas mer bestämmer valet än exakta krav på mekaniska prestanda för den slutgiltiga fiberkompositkonstruktionen.

De vanligaste förekommande formerna för armeringsfibrer vid laminering är:

- **Flock** – lösa huggna fiberbitar
- **Matta** – sammanbundna huggna fiberbitar eller längre fibrer slumpmässigt placerade
- **Roving** – tråd bestående av tusentals fibrer på rulle
- **Enkelriktad väv** – väv eller band med fibrerna längsmed
- **Väv** – armeringsfibrerna vävda till en tygliknande väv

Fiberformöversikt – förekommande formerna för armeringsfibrer vid laminering

Fiberform	Användningsområden, ingående fibermaterial, sizing	Fördelar	Nackdelar
Flock	I lågprestandalaminat, för att blanda till glasfiberspäckel, används vid förformning av fibermatta E-glasfibrer sizade för polyester	+ Mycket lågt pris	- Låg fiberhalt - Svårt att utnyttja vid handläggning
Matta	Generell användning i alla typer av laminat där hållfasthetsegenskaperna är underordnade, eller där belastningsriktningen ej är känd. Utmärkt till komplicerade dubbelkrökta former. E-glasfibrer, sizade för polyester.	+ Klarar alla typer av former, även komplicerade dubbelkrökta + Enkel att utnyttja, snabb tillpassning innan laminering + Lågt pris	- Låg fiberhalt - Kan inte lamineras med lösningsmedelsfri härdplast som epoxi
Roving	Lindning, eller lokal förstärkning, uppbyggnad av master och liknande samt till sprutning av laminat Alla fibermaterial.	+ Lågt pris + Möjligt att utnyttja för att pressa ihop runda och lindbara laminat + Riktade hållfasthetsegenskaper	- Svårt att utnyttja till stora ytor

Enkelriktad Väv	Lokala förstärkningar eller i laminat med förbestämda belastningsriktningar. Ofta kolfiber men även E-glas och S-glas, i undantagsfall aramid. Ofta sizad för epoxi.	+ Maximal styrka och styvhet i bestämda riktningar, möjlighet att optimera och styra laminatets hållfasthets egenskaper + Hög fiberhalt	- Ofta relativt smala band ej lämpliga för uppbyggnad av stora ytor
Väv	Alla fibermaterialtyper, glasfiber, kolfiber, aramid, Terylene och Dyneema. Förekommer sizad både för epoxi, polyester och vinylester.	+ Hög fiberhalt i förhållande till matta + Attraktivt utseende om väven är uppbyggd av optiskt täta fibrer som kolfiber	- Svårt eller omöjligt att anpassa till komplicerade former

5.1 Flock



Lösa fibrer, oftast glasfiber (E-glas) 5-50mm långa. Säljes i lösvikt till lågt pris. Utnyttjas genom att läggas ut på lokala platser i laminat där det kan vara svårt att utnyttja matta men även genom att blandas med hartsen för att skapa glasfiberspäckel.

Utnyttjas även vid industriell framställning av förformad fibermatta och andra industriella metoder för framställning av armerad plast där harts och fiber blandas i förväg.

Flock lamineras nästan uteslutande med polyester och fibrerna är normalt sizade för polyester.

Armering med flock ger laminat med låg fiberhalt (20-30%) och begränsade hållfasthetsegenskaper.

5.2 Matta

CSM- Chopped Strand Mat

Fibermatta bestående av huggen armeringsfiber, 25-100 mm långa (oftast 40-50mm), parter om ca 200 enskilda fibrer, som ligger slumpmässigt i alla riktningar. Vikten är som standard mellan 200 gr/m² och 1200gr/m².



Emulsionsbunden korthuggen glasfibermatta 300gr/m² för armering av polyester

Utnyttjas vid laminering med polyester som matris för att skapa s.k. GRP-konstruktioner (*Glass fibre Reinforced Plastics - glasfiberarmerad plast*).

Möjliggör snabb och flexibel handläggning över komplicerade former och stora ytor och snabb uppbyggnad av laminattjockleken.

Ger laminat med låg fiberhalt (30-50%) och låga hållfasthetsegenskaper men som har samma egenskaper i alla riktningar i laminatets plan.

Mycket vanligt förekommande i båtskrov och liknande glasfiberkonstruktioner.

Korthuggen fibermatta är ofta det självklara valet vid fiberkompositlaminering av konstruktioner där vikt eller hållfasthetsegenskaperna inte är av högsta prioritet.

De huggna fibrerna är sammanbundna med ett bindemedel som löses upp av lamineringsplasten. De vanligaste förekommande bindtyperna för CMS-mattor:

- **Emulsionsbunden**
- **Pulverbunden**

Bindemedlet i emulsions- eller pulverbunden matta löses upp av polyesterns styren då mattan väts med plasten. Fibrerna blir då fritt flytande i plasten och kan formas till mycket komplicerade former.

Även vinylester som innehåller styren löser upp bindemedlet i korthuggna mattor men eftersom styrenhalten är lägre än för polyester och bindemedel av pulvertyp kräver hög styrenhalt för att helt lösas upp kan endast emulsionsbundna mattor lamineras med vinylester.

Eftersom lamineringsepoxi vanligtvis inte innehåller något lösningsmedel är det olämpligt att laminera emulsion- eller pulverbunden matta med epoxi. Resultatet om man trots allt försöker laminera matta med epoxi blir att mattan väts dåligt och att bindemedlet endast delvis löses upp vilket medför ett grumligt laminat med låg fiberhalt och dåliga hållfasthetsegenskaper.

Då korthuggen mattan tillpassas till formen innan laminering bör den inte klippas av utan rivas varvid övergången blir diskret då bindemedlet i mattan har lösts upp.

Ytmatta

Mycket tunn matta ($10\text{-}100\text{gr/m}^2$), ofta med C-glasfibrer, som ger en jämn, tät yta på laminatet. Det förekommer även ytmattor i sega syntetfibrer (tex polyester / Terylene™) som även förbättrar slagtlågheten för laminatet.

Utnyttjas som närmsta lager mot gelcoat för att minimera risken för att fiberstrukturen syns igenom samt ge bättre kemiskt och mekaniskt skydd.



Ytmatta C-glas 22gr/m^2

CM – Continuous Mat

Fibermatta med kontinuerliga fibrer i slingor, används i samband med pressning och industriell injiceringslaminering men rekommenderas inte till handläggning.

5.3 Roving

Roving är armeringsfibrer ihopbuntade till en grövre otvinnad trådliknande form. Grovleken på rovingen styrs av mängden fibrer som den innehåller, vanligtvis kring 1000 till 24 000 enskilda fibrer, benämns med K-tal där K står för 1000 fibrer (*eng: number of filaments*). Även diametern på varje enskild fiber samt hur hårt bunden rovingen är styr grovleken på rovingen där tex en 12K-roving (roving med 12 000 enskilda fibrer) kan ha en diameter på mellan någon tiondels millimeter upp till två millimeter.

Rovingen är upplindad på stora spolar s.k. bobiner som rovingen lindas av, utifrån eller inifrån. Alla vanliga armeringsfibrerna för laminering finns i rovingform, glasfiber, kolfiber och aramid.



Kolfiberroving på rulle

Roving kan användas direkt vid laminering, för att lindas runt laminat eller sträckas mellan två eller flera punkter varvid laminat med förbestämd fiberriktning och hög fiberhalt kan åstadkommas. Roving utnyttjas även för lokala förstärkningar tillsammans med matta eller väv samt vid sprutlaminering. Roving utnyttjas även vid tillverkning av fibervävar.

5.4 Enkelriktad väv

I en enkelriktad väv - UDR – *Unidirectional Roving* är alla eller huvuddelen av fibrerna förlagda i samma riktning.



Enkelriktad kolfiberväv Toray T-600 med svetsad tvärbindingstråd

Enkelriktad väv kan antingen vara vävd av roving (oftast plainvävning) där huvudparten av fibrerna är i samma rikning eller i en form där fibrerna ligger parallellt och tvärbinds med en tråd av samma eller annat material.

De vanligaste förekommande tvärbindingarna är:

- **Vävd tvärbindingstråd** – tvärbindingstråden vanligtvis av samma fibermaterial är vävd tvärs de längsriktade fibrerna.
- **Sydd tvärbindingstråd** – tvärbindingstråd antingen av samma eller ett mer flexibelt fibermaterial sydd tvärs de längsriktade fibrerna
- **Svetsad tvärbindingstråd** – tunna termoplaststrådar är smälta tvärs de längsriktade fibrerna, tillåter att den längsriktade väven delas ner i smalare band på längden utan att väven faller isär.

Enkelriktad väv utnyttjas i fiberkompositkonstruktioner främst där belastningsriktningen är känd, för att ge maximal styvhet och styrka i en eller flera bestämda riktningar.

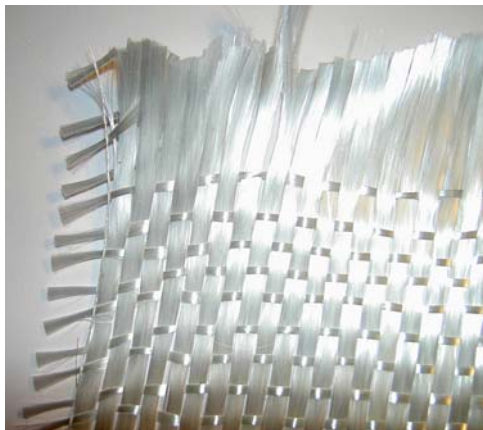
En hög fiberhalt kan åstadkommas vid laminering av enkelriktad väv pga fibrerna är tätt packade i förhållande till i vävar eller mattor där fibrerna är i flera riktningar i samma plan.

Därmed är det möjligt att skapa kompositkonstruktioner med låg vikt och goda mekaniska prestanda och med speciella egenskaper som eftersträvas på olika platser i konstruktionen. Enkelriktad väv utnyttjas även till lokala förstärkningar i bestämda riktningar i laminat baserade på matta eller dubbelriktad väv.

I konstruktioner där hög fiberhalt eftersträvas men belastningsriktningen är okänd kan enkelriktad väv lamineras så att väven riktas i olika riktningar för olika lager, liknande uppbyggnaden för plywood-träplattor.

Enkelriktad väv är en vanlig form för kolfiber, då kolfiber i konstruktioner ofta utnyttjas för lokala förstärkningar eller för att åstadkomma laminat med riktad styvhet och styrka eller bestämda hållfasthetsegenskaper på olika platser i konstruktionen.

5.5 Väv



Rovingväv, E-glas, längsriktad, plain-vävning, 600gr/m²

I en väv är armeringsfibrerna vävda på ungefär samma sätt som i ett grovt tyg. Fiberväven är vävd av roving. Grövre vävar kallas rovingvävar (*WR = Woven Roving*) medan finare vävar kallas garnvävar.

Fibervävar kan även benämnas efter hur grov den ingående rovingen är genom rovingens k-tal, dvs hur många tusen enskilda fibrer som varje rovingtråd innehåller.

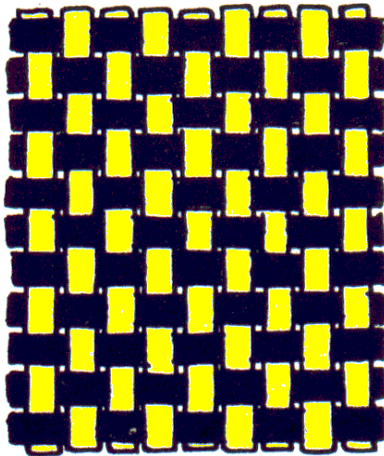
Det förekommer många olika vävningar beroende användningsområdet för väven, hur tät den skall vara, om den skall vara drapérbar dvs kunna sträckas över dubbelkrökta ytor osv.

Nedan visas schematiska bilder över några vävtyper. För tydlighetens skull har de två fiberriktningarna färgats med olika färger, värften (horisontella trådar) svart och varpen (vertikala trådar) gult/ljust.

Vanliga vävar:

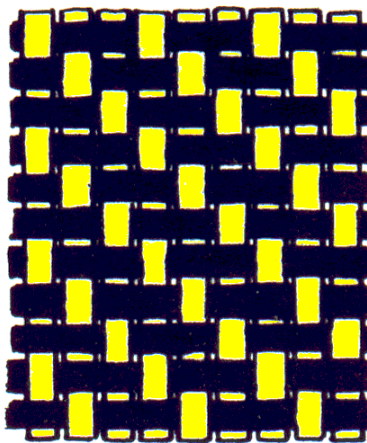
Plain (tvåskaft)

Täta vävar



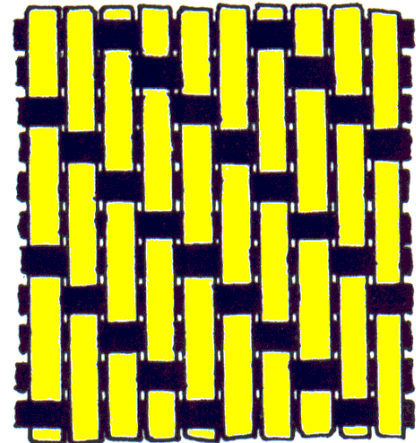
Twill (kypert)

Medeltäta drapérbara vävar



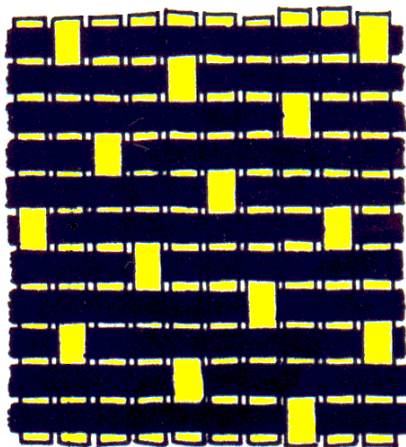
Satin

Medeltäta med god drapérbarhet

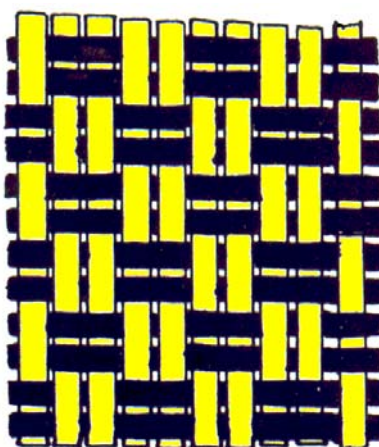


Ovanligare vävar:

Atlas



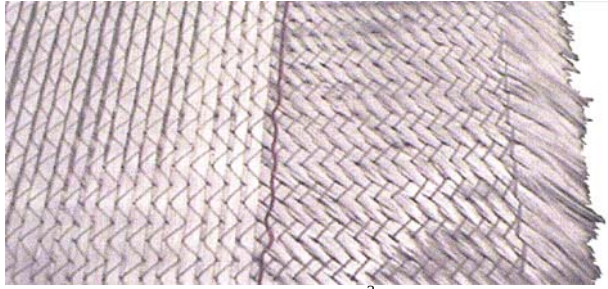
Basket



Det förekommer även andra vävtyper där rovingen inte är placerad i horisontell och vertikal riktning ($0/90^\circ$) och även vävar där rovingen är placerade i flera riktningar än två:

- **Biaxial** tex 60° där riktningarna är 60° från varandra istället för 90°

- **Multiaxial** tex 4-axial där rovingen är vävd i fyra riktningar



Multiaxial glasfiberväv 1040gr/m²

Det förekommer även en rad specialvävar exempelvis:

- **Ögleväv** – väv med öglor som vid laminering bildar upphöjningar som sandwichmaterial kan fästa vid, vid skumning av polyuretankärna på platts.
- **Strumpa** – rörformad flexibel vävning som medger att väven kan sträckas över en rörform, även med varierande tjocklek för att ta fram sömlösa laminat med attraktivt utseende framförallt i kolfiber

5.6 Val av fiberutformning

I fiberkompositkonstruktioner bestäms de mekaniska egenskaperna utöver konstruktionens utformning främst av vilka fibrer som armerar plasten och dess mekaniska egenskaper men i lika stor utsträckning hur dessa fibrer är placerade i laminatet, dess riktning, varje enskild fibers längd och mängden fibrer i laminatet. Det som bestämmer hur fibrerna är placerade i konstruktionen och fibrernas längd är i vilken form som fibrerna var innan lamineringen.

Även om laminering med korthuggen glasfibermatta ger måttliga hållfasthetsegenskaper är det ofta det självklara valet vid handläggning vilket är den vanligaste lamineringsformen för privatpersoner, mindre industriell skala och vid laminering av stora konstruktioner.

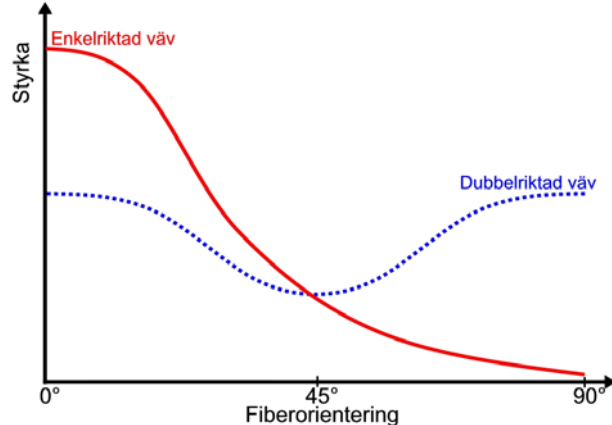
Korthuggen matta medger enkelt lamineringsförfarande och möjligheten att lamineras i komplexa former samt anpassa tjockleken på olika platser utan att förbereda fibrerna i någon större omfattning innan lamineringen. Laminat baserade på korthuggen matta har samma mekaniska egenskaper i alla riktningar varför det är enkelt att dimensionera konstruktionen utan mer än uppskattningar eller enklare beräkningar genomförs.

För att öka hållfastheten och styra konstruktionens mekaniska egenskaper förstärks laminatet baserad på korthuggen matta ibland med längsriktad väv eller i vissa fall roving.

Om kraven på hållfastheten hos konstruktionen är högre eller det finns krav på låg vikt faller valet på fiberutformning till vävar, enkelriktade eller flerriktade, beroende konstruktionens utseende och i vilken riktning som konstruktionen belastas.

Styrkan hos ett laminat armerad med en dubbelriktad väv är starkast då belastningen är i samma riktning som någon av fiberriktningarna och är som svagast 45° från någon av riktningarna.

Motsvarande enkelriktad väv ger närmast ett dubbelt så starkt laminat i den riktning som fibrerna är riktade i, men ett laminat som är mycket svagt 90° från fiberriktningen.



Styrkan i förhållande till fiberorienteringen hos laminat armerade med enkelriktad och dubbelriktad väv

Vävar utnyttjas inte bara då starkare laminat vill uppnås eller riktningen är känd utan även då epoxi används som matrismaterial, då epoxi inte kan lösa upp bindemedlet i korthuggen matta och fibrerna i mattor inte är sızade för epoxi.

Det är möjligt att laminera relativt komplexa former och dubbelkrökta ytor om väven som utnyttjas är drapérbar.

Laminering med väv istället för matta ger även högre fiberhalt vilket ger bättre hållfasthetsegenskaper i förhållande till vikten.

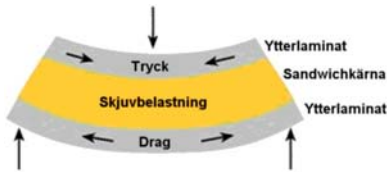
Eftersom laminat baserade på vävar generellt blir starkare i förhållande till vikten kan materialåtgången minskas drastiskt i förhållande till i laminat baserade på korthuggen matta, speciellt om längsriktade vävar eller roving utnyttjas för att maximera fibrerna i den riktning som laminatet belastas. Detta medger att kostnaderna för konstruktionen kan bli lägre trots att laminatets mekaniska egenskaper blir bättre och vikten lägre. Detta kan även gälla om epoxi används istället för polyester trots ett högre kilopris för hartsen.

Ett specialfall är i de fall där fiberns utformning utnyttjas för att ge konstruktionen en viss ytfinish och utseende. Det handlar då ofta om kolfiber i form av väv (ofta 2x2-twill) lamineras med optisk klar plast. De förekommer även att fibrerna färgas i vävar (ofta Kevlar) som främst utnyttjas för att ge ett attraktivt utseende.

6 Sandwich

En sandwichkonstruktion är uppbyggt så att ett lätt kärnmaterial håller samma lastupptagande material på var sida om kärnmaterialiet. På detta sätt flyttas de lastupptagande materialen längre bort från konstruktionens centrum varvid materialets styvhet i förhållande till vikten ökas drastiskt. Detta utnyttjas i allt från enkla all dagliga konstruktioner som dörrar och hyllplan till komplexa konstruktioner som flygplansvingar.

Vid konstruktion med armerade hårdplaster är sandwichuppbyggnad ett relativt enkelt men effektivt sätt att öka konstruktionens styvhet och styrka utan att öka vikten, eller för att minska konstruktionens vikt, materialåtgången och kostnaden.



I den schematiska figuren till vänster visas hur krafterna fördelas då ett sandwichlaminat med ett lätt kärnmaterial och lastupptagande ytterlaminat belastas på mitten och stöds mot ändarna. Det undre ytterlaminatet utsätts då enbart för dragande belastning medan det övre ytterlaminatet enbart utsätts för tryckande belastning. Kärnan utsätts för skjuvbelastning mellan de undre och övre ytterlaminaten.

Skillnaden på densiteten mellan de lastupptagande yttermaterialen och kärnmaterialiet i en konstruktion baserad på fiberarmerad plast är ofta mellan 1:10 och 1:100, dvs kärnmaterialiet har en densitet mellan $0,02\text{gr/cm}^3$ och $0,2\text{gr/cm}^3$ eller 20kg/m^3 och 200kg/m^3 medan ytterlaminaten har en densitet kring 2gr/cm^3 .

De krav man ställer på ett kärnmaterial för sandwichkonstruktioner är följande:

- Låg densitet
- Goda hållfasthetsegenskaper i förhållande till vikten, främst vid skjuvbelastning
- Hög dämpande effekt vid slag

Ofta kräver man även att kärnmaterialiet skall isolera mot värme och kyla samt dämpa mot ljud. God beständighet mot vatten och fukt krävs då sandwichlaminat utnyttjas i marina tillämpningar. Kärnmaterialiet bör dessutom ha högt motstånd mot lösningsmedel, främst styren som ingår i vinylester och polyester för att fungera som sandwichmaterial laminerade med dessa härdplaster.

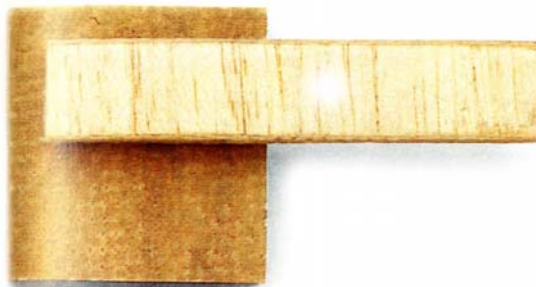
Det förekommer tre huvudtyper av kärnmaterial för sandwichkonstruktioner:

- Trä
- Skumplast
- Honeycomb



Trä

Trä som kärnmaterial i sandwichkonstruktioner är ofta synonymt med balsa, det lättaste av alla träslag. Balsa har en låg densitet men förhållandevis goda hållfasthetsvärden vilket gör balsaträ lämpligt som kärnmaterial.



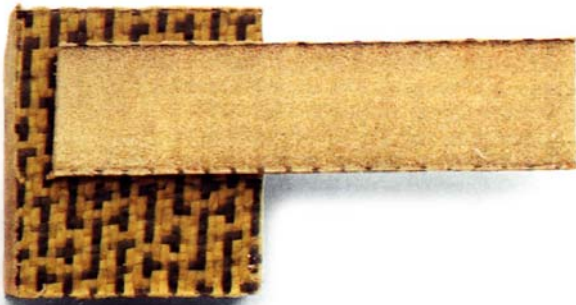
Glasfiberlaminat på kärna av tvärlimmad balsa

Balsaträt utnyttjas tvärskuren, där träs fibrer är riktade tvärs ytterlaminaten. Balsaträt är dessutom ofta utsågad i kuber som är limmade på en fiberväv. Detta gör att man kan laminera balsaträt över krökta former. Tjockleken är vanligtvis kring 20mm. Balsaträ är vanligt som sandwichmaterial i överbyggnader på GRP-båtar.

Även andra tyngre träslag utnyttjas men har då ofta inte samma syfte som ett traditionellt kärnmaterial i en sandwichkonstruktion – att flytta isär de lastupptagande materialen, utan står för huvuddelen av styrkan i konstruktionen där ytterlaminaten bara skyddar träet från vatten och mekanisk åverkan.

Skumplast

Skumplaster eller cellplaster är plastmaterial som har tillåtits expandera på olika sätt varvid material med låg densitet har åstadkommits.



Laminat armerad med hybridmatta (kolfiber-Kevlar) på en kärna av vinylcellplast

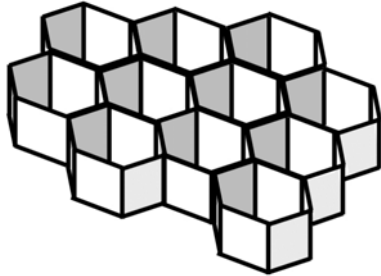
Det förekommer många olika skumplaster med olika egenskaper och olika densitet, även inom samma skumplastmaterial. Hållfastheten är ofta i proportion till densiteten där en högre densitet ger en starkare och styvare skumplast. De vanligaste densiteterna vid fiberkompositlaminering är $20\text{kg/m}^3 - 200\text{kg/m}^3$. Som kärnmaterial i sandwichkonstruktioner är tjockleken vanligtvis mellan några millimeter och någon decimeter även om skumplaster förekommer i tjocklekar över en meter.

Skumplaster kan antingen ha sluten eller öppen struktur vilket innebär att den skummade platen eller de små celler som materialet består av, antingen kan vara slutna eller öppna sinsemellan. En sluten struktur suger inte åt sig vatten i någon större omfattning och är därmed mer okänslig för fukt än en cellplast med öppen struktur. Detta gäller även i sandwichlaminat då fukt ibland riskerar läcka igenom de skyddande ytterlaminaten, speciellt om materialet står under vatten konstant. En sluten struktur suger även mindre matrisplast vid lamineringen vilket innebär en lägre vikt.

Vissa skumplaster som vinylcellplast kan böjas vid värme vilket kan vara till stor fördel vid sandwichkonstruktioner med något mer komplex form. Annars är det vanligt att cellplastplattorna säljs rutskurna limmade på en väv, på samma sätt som med balsaträ för att möjliggöra laminering över böjda former.

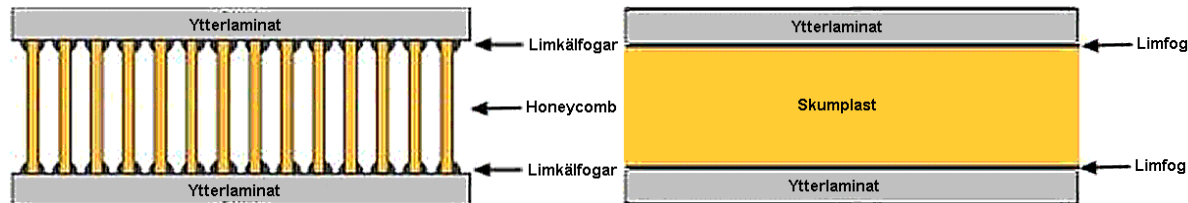
Honeycomb

Honeycomb eller bikupestruktur innebär att kärnmaterialet är uppbyggt kring stående väggar där sexhörningar bildar en struktur. Mellan två lastupptagande väggar bildar honeycombstrukturen ett styvt sandwichmaterial med låg vikt.



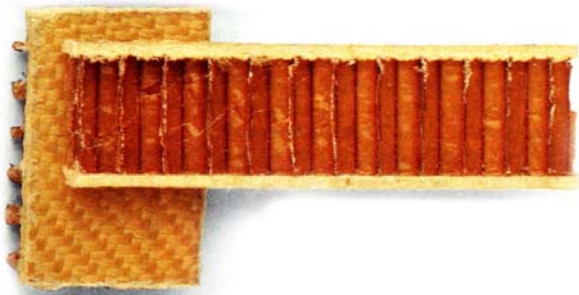
Schematisk skiss över honeycombstrukturen

Materialet kan vara i kartong, termoplast, aluminium eller fiberarmerad plast. Honeycomb i kartong är olämpligt i fiberkompositer medan honeycomb i termoplast eller aluminium kan medföra problem då den begränsade limmytan inte ger tillräcklig hållfasthet. Se bilden nedan:



Schematisk bild över skillnaden mellan limytorna hos sandwichlaminat med honeycomb och skumplast som kärnmateriäl

Det starkaste, styvaste honeycombmaterial som dessutom ger god möjlighet till fäste vid limningen mellan strukturen och ytterlaminaten är honeycomb med fiberkompositer som material, främst aramid. Nomex™ (salufört av DuPont) är ett honeycombmaterial av Kevlar som anses vara bland det starkaste och styvaste kärnmaterialet vid sandwichkonstruktioner som existerar.



Aramidlaminat på honeycombkärna (Nomex)

Skumning på platts



Enkomponents polyuretanskum

Utöver de traditionella kärnmaterialen som läggs in vid lamineringen av sandwichlaminat förekommer även en annan metod där materialet skummas på platts efter ytterlaminaten redan är laminerade. Det vanligaste materialet för skumning på platts är polyuretan. Polyuretanet förekommer både i en- och tvåkomponentsform. Enkomponentsskum på sprayflaska som förekommer i vanliga byggvaruhus och kallas fogskum eller byggsaum är enkelt att utnyttja men har för dåliga mekaniska egenskaper för att fungera som ett kärnmaterial i sandwichkonstruktioner där kärnmaterialiet belastas.

Tvåkomponents polyuretanskum har bättre mekaniska egenskaper och lämpar sig bättre som kärnmaterial i sandwichkonstruktioner men är betydligt svårare att utnyttja och därtill svårt att köpa. Skumning på platts är därför ovanligt för privatpersoner.

Fibermatta med fyllmedel

En femte form som egentligen inte är ett regelrätt sandwichmaterial bygger på fibermattor där fyllmedel med låg densitet, mikrobällor, har blandats in. Fyllmedlet bygger på tjockleken utan att extra material behöver tillföras vilket gör att det går snabbt och enkelt att bygga upp laminattjockleken. Vikten blir dock hög och likaså plaståtgången.

Kärnmaterialöversikt – de vanligaste kärnmaterialen i sandwichkonstruktioner med fiberkomposityttskikt

Sandwich-material	Fördelar	Nackdelar
Balsa / trä	+ Välbeprövat + Hög draghållfasthet	- Fuktkänslig
Polystyren NM-plattan™ Frigolit™	+ Lågt pris + Enkel att skära ut med värme + Går delvis böja med värme	- Tål inte styren eller starkare lösningsmedel (däremot epoxi) - Förekommer endast i lägre densiteter (upp till 80kg/m³)
Vinylcellplast Divinycell™ Herex™	+ Goda mekaniska egenskaper + Slutna celler, suger inte så stora mängder plast + Okänslig mot vatten och fukt + Går att böja med värme	- Förhållandevis högt pris
Polyuretan Bonocell™ Inotan™	+ Goda dämpande egenskaper vid slag	- Dålig draghållfasthet – delas lätt
Akryl Rohacell™	+ Goda temperaturegenskaper + Goda mekaniska egenskaper	- Högt pris - Låg brottöjning
Fenolplast	+ Goda temperaturegenskaper + Brandtålig	- Låg brottöjning
Honeycomb Nomex™	+ Högst styvhet och styrka i förhållande till vikten	- Högt pris - Svårt att utnyttja vid krökta dubbelkrökta ytor - Om kärnan deformeras minskar hållfastegenskaperna drastiskt - Liten yta mellan yttskikten och kärnan gör limning kritisk

Skumning på platts Polyuretan	+ Flexibelt , kräver minimalt arbete vid komplicerade former + Goda dämpande egenskaper vid slag	- Komplicerat skumningsförfarande av tvåkomponentspolyuretan - Dålig tillgänglighet av tvåkomponentspolyuretan - Dålig draghållfasthet – delas lätt
Fibermatta med fyllmedel	+ Enkelt och snabbt att bygga upp laminatjocklek	- Hög vikt - Mycket plaståtgång

Prisjämförelse

Cirka priser (år 2003) på kärnmaterial i mindre kvantitet 1-10m² tjocklek 10mm:

Polystyren – NM-plattan (55kg/m³): **90kr/m²**
Vinylcellplast – Divinycell H60 (60kg/m³): **350kr/m²**
Polyuretan – Bonocell S40 (40kg/m³): **90kr/m²**
Balsa – ändklossar limmade på glasfiberväv: **400kr/m²**

Kommentar till prisjämförelsen:

Alla kärnmaterial i prisjämförelsen förekommer i andra tjocklekar. Priset står ungefär i proportion mot tjockleken.

Vissa av kärnmaterialen förekommer i andra densiteter. En högre densitet ger högre pris.

Främst vinylcellplast förekommer i många olika kvalitéer och densiteter med kraftigt skiljande priser. Vinylcellplast med goda mekaniska prestanda eller som är framtagen för att uppfylla specialkrav betingar ett högre pris.

7 Tillsatsmaterial, fyllmedel

Genom att blanda i olika tillsatser i en lamineringshärdplast kan man ändra plastens egenskaper och utseende. Tillsatsmaterialet kan antingen vara aktivt och tex ändra plastens härdningsförlopp eller elasticitet i härdat tillstånd eller vara passivt varvid molekyler i plasten ej påverkas vid inblandning.

Att utnyttja aktiva tillsatsmaterial vid lamineringssammanhang, utöver nödvändig härdare och accelerator är ovanligt då detta kräver relativt stor kunskap för att ge ett bra resultat. Däremot är det vanligt att blanda i olika former av passiva tillsatsmaterial för att anpassa lamineringsplasten efter de aktuella kraven.



Fyllmedel för hårdplaster, främst epoxi. Från vänster till höger: mikrobällonger (brun), mikrobällonger (vit), limpulver (cellulosapulver), tixotroppulver (kiseloxid)

De vanligaste förekommande passiva tillsatsmaterialen för lamineringsplast är dessa:

- **Mikrobällonger** – vitt eller brunt mycket lätt pulver bestående av ihåliga glaskulor med 40-100 µm i diameter. Sänker hartsens densitet och höjer viskositeten. Utnyttjas för att omvandla lamineringsplasten till spackel eller lim.
- **Limpulver** – vitt lätt pulver vanligtvis tillverkat av cellulosa. Ökar hartsens viskositet, sänker densiteten samt ger viss armerande effekt. Utnyttjas för att omvandla lamineringsplasten till lim eller spackel.
- **Talk** – vitt pulver som utnyttjas för att höja hartsens viskositet och ”späda ut” plasten till en låg kostnad.
- **Tixotroppulver** – vitt pulver, vanligtvis kiseloxid, som helt löser sig i hartsen och i liten omfattning påverkar plastens optiska klarhet. Utnyttjas för att tixotropera harts vilket innebär att viskositeten ökas utan att den vätningsförmågan i någon större omfattning försämras.
- **UV-skydd** – vanligtvis titanoxid, som ger hartsen en mjölkliknande färg. Utnyttjas främst tillsammans med lamineringsepoxi för att öka plastens UV-skydd och skydda underliggande laminat mot att brytas ner vid exponering av solljus.
- **Pigment** – infärgningspulver eller infärgningspasta som utnyttjas för att antingen ändra färgen på gelcoat och topcoat, omvandla lamineringsplasten till färg eller infärga fiberlaminat något som kan underlätta vid handläggning för att kontrollera om glasfibrer väts av hartsen.

Inblandning:

Generellt skall passiva tillsatsmaterial blandas in i hartsen efter att den har blandats med härdaren då den högre viskositeten tillsatsmaterialet kan ge upphov till annars ökar risken för dålig blandning mellan bas och härdare.

Mängden tillsatsmaterial anpassas efter situationen – en hög inblandning av tex fyllmedel då hög viskositet krävs, hög inblandning av pigment då en kraftig infärgning krävs osv.

Allt för hög inblandning av fyllmedel vid limning kan dock ge risk för att viskositeten blir så hög att plasten inte i tillräcklig omfattning tillåts väta de ytor som skall limmas.

Generellt bör fyllmedel inte blandas i harts vid laminering av fibrer (utöver tixotroppulver då detta krävs) då vätningsförmågan av fibrerna försämras, något som kan försvåra laminering och påverka laminatets hållfasthet negativt. Eventuell viss inblandning av pigment eller UV-skydd påverkar dock normalt inte laminatet.

8 Lamineringsmetoder

Om en komposittillverkning sker så att kompositen läggs i skikt som varvas kallas slutresultatet laminat och metoden kallas laminering. Ofta kallas även andra komposituppläggningsmetoder av armerad plast som inte strikt läggs i varvade skikt för laminering varvid de metoder som utnyttjas då en fiberarmerad plast framställs generellt kallas lamineringsmetoder.

För att konstruera ett föremål i fiberarmerad härdplast krävs att fibrerna väts av plasten ovanpå eller inuti någon typ av form. För privatpersoner och vid mindre industriella serier handlar det ofta om att laminatet skapas antingen genom att fibern placeras på eller inuti formen varvid den direkt väts med den härdande plasten. Det kan även handla om att fibern är förimpregnerad med harts (s.k. Pre-preg) som härdas genom att laminatet värms upp. En tredje vanlig metod för att skapa billiga laminat snabbt är att den härdande plasten sprutas på formen tillsammans med avhuggen armeringsfiber.

Undvika luftbubblor i laminatet

Det härdande våta laminatet måste behandlas för att laminatet skall bli tätt och följa formen väl samt för att luftbubblor i laminatet undviks, vilka annars bla kan försämra hållfasthetsegenskaperna avsevärt för det härdade laminatet.

Denna behandling kan ske manuellt genom att det våta laminatet pressas med metallroller, spackel eller pensel. Behandlingen kan även ske genom att armeringsfibrer lindas runt laminatet om detta tillåts varefter eventuellt tejp eller polyetenplast späns över.

En annan metod är att utnyttja en yttre form tillsammans med en inre form som det blöta laminatet pressas mellan.

En generell metod som ofta utnyttjas vid mer seriös laminering av privatpersoner eller i mindre industriell skala är att en plastduk späns över laminatet varefter luften sugas ut, en metod som kallas *vakuum bagging*.

Vissa av dessa metoder utnyttjas även för att pressa ut så mycket plast som möjligt för att därmed ge ett laminat med högre fiberhalt som därmed blir styvare och starkare i förhållande till vikten.

Laminering vått-i-vått

För att få ett homogent laminat där plasten tillsammans med armeringsfibrerna bildar en enhet bör laminatet i största möjliga mån läggas "vått-i-vått". Detta innebär att laminatet bör läggas på en gång så att plasten inte har hunnit härda innan nästa lager läggs på. Annars finns alltid risk för att laminatet blir svagare mellan olika fiberlager och kan delaminera vilket innebär att det delar på sig utmed ett laminatlager vid belastning.

Om det inte är möjligt att lägga laminatet vått-i-vått, om tex föremålet som skall lamineras är för stort, om det krävs så tjocka laminat att det finns risk för att härdplasten överhettas pga den exoterma reaktionsvärmen inte hinner avkylas, om uppbyggnad av kompositföremålet kräver att det sker i steg eller liknande bör man eftersträva att laminatlagren inte hinner genomhärda utan att nästkommande lager läggs då laminatet fortfarande är klibbigt.

Om laminat ändå måste läggas på genomhärdat laminat krävs det att ytan förbehandlas innan enligt följande:

Polyester – förberedelser innan laminering på genomhärdat laminatskikt

Polyester innehåller ofta vax för att reducera styrenavdunstningen. Detta gäller speciellt s.k. miljöpolyester och topcoat. I det härdade laminatet ligger vaxskiktet på ytan och begränsar möjligheten för att ett ytterligare lager med polyester (vinylester eller epoxi) skall kunna fästa. Vaxlagret avlägsnas med aceton som även gör ytan klabbig vilket förbättrar möjligheten för nästa polyesterlager att binda sig med det tidigare.

Ännu bättre blir resultatet om ytan efter rengöring av aceton raspas eller slipas grovt. Innan den nya lamineringen påbörjas tas allt damm bort med vatten varefter ytan rengörs med aceton. Förfarandet sker på samma sätt vid laminering med vinylester.

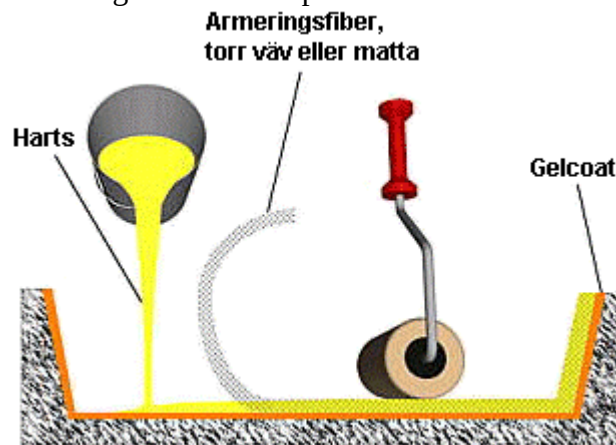
Epoxi – förberedelser innan laminering på genomhärdat laminatskikt

Då lamineringsepoxi härdar i kontakt med luft påverkar luftens koldioxid och vattenånga epoxin varvid det bildas ett tunt osynligt karbonatskikt på den härdade epoxilaminatets yta.

Karbonatskiktet försämrar möjligheten för ytterligare epoxilager att fästa perfekt. Skiktet tas bort genom att ytan tvättas med 10 procentig citrönsyralösning eller ättiksyra, helst i kombination med grov slipning av ytan. Eventuellt damm sköljs bort och ytan tvättas ren från eventuellt fett eller smuts med aceton direkt innan nästa lager lamineras på. Detta är extra viktigt då lamineringsepoxi normalt inte innehåller några lösningsmedel som kan lösa upp fett eller smuts.

8.1 Handläggning

Handläggning är den i särklass vanligaste metoden för privatpersoner och mindre industriell framställning samt vid laminering av stora kompositkonstruktioner som tex båtskrov.



Principskiss över handläggning av laminat i honform

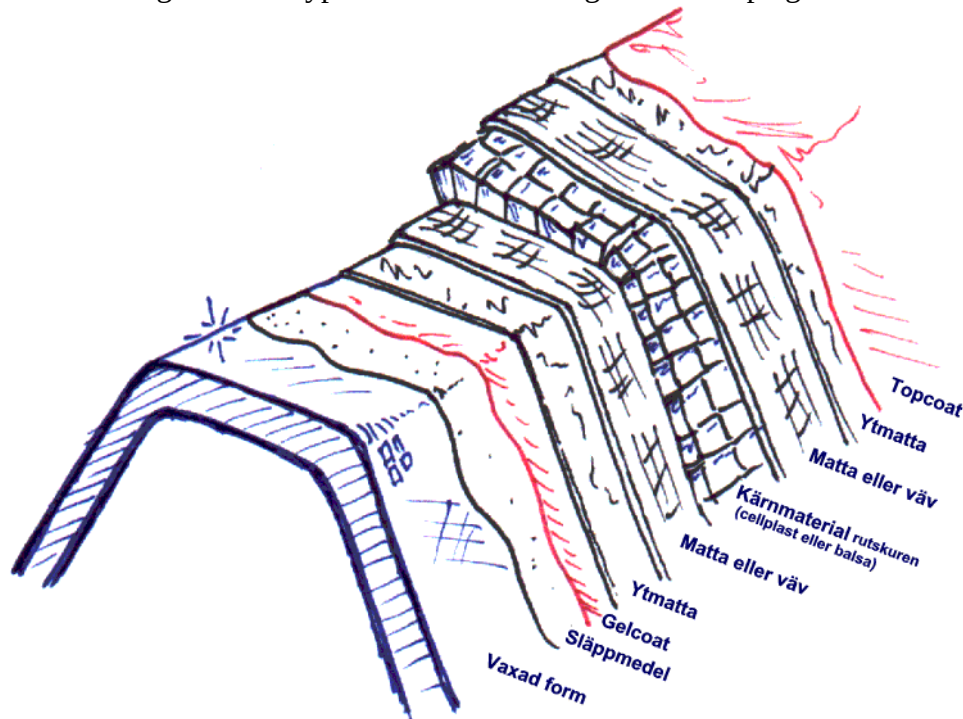
Vanligtvis varvas blandad härdande harts med fiberväv eller matta. Fibern väts med hjälp av pensel eller roller tills den är mättad utan att onödig mängd plast tillförs. Är det glasfiber som lamineras går det se relativt tydligt om fibrerna är genomväta av plasten. Om plasten är något pigmenterat underlättas denna kontrollmöjlighet ytterligare.

Om det är tunna vävar eller mattor (under 300gr/m²) som lamineras i flera skikt räcker det ibland att endast väta vartannat skikt och låta de undre skikten väta de skikt som inte tillförs plast, genom att väven pressas med pensel, spackel eller metallroller. På detta sätt kan man skapa ett laminat med relativt hög fiberhalt (upp mot 60% vid laminering av väv och 50% vid laminering

av matta) som därmed har hög styvhet och styrka i hörhållande till vikten. Risken för att laminatet inte blir helt genomvätt ökar dock varvid laminatet kan få luftinneslutningar eller partier med torr väv något som kraftigt försämrar laminatets hållfasthetsegenskaper.

Då hartsen blandas till med härdare och eventuell accelerator innan lamineringen är det viktigt att man bedömer hur mycket plast man kommer att hinna med att förbruka innan den har börjat gela (inom geltiden för polyester och vinylester och inom potlife-tiden för epoxi). Om för stora mängder blandas i ett kärl föreligger risk att härdningsreaktionen rusar efter en stund pga för hög värme från den exoterma härdningsreaktionen i förhållande till den lilla avkylande yta. Den kvarvarande plasten blir då obrukbar.

Skissen nedan visar hur ett sandwichlaminat med glasfiberarmerad polyester normalt läggs, de olika lagren och ordningen. Detta typ av laminat är vanligt som däck på glasfiberarmerade båtar.



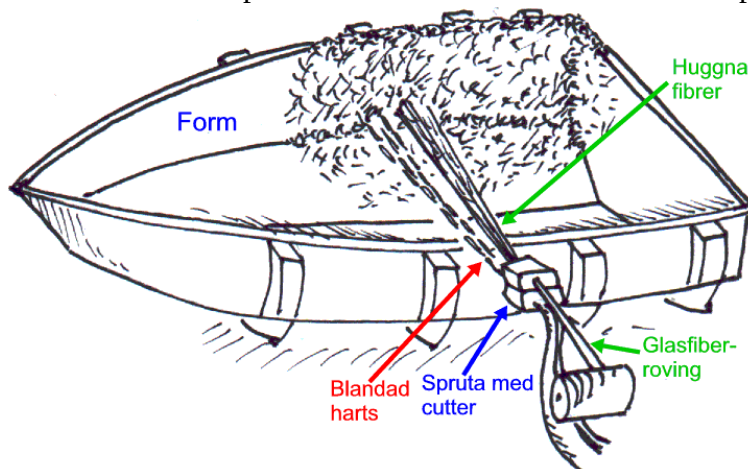
Lamineringen sker enligt följande:

1. Den polerade, vaxade formen förses med släppmedel – polyvinylalkohol, ett filmsläppmedel som bildar en tunn vattenlöslig film. Ett till tre tunna lager penslas eller sprutas på. Undvik att få rinnmärken eller strån från penseln, damm eller smuts i släppmedlet. Släppmedlet tillåts torka ordentligt innan laminering på formen påbörjas (tar någon till några timmar).
2. Ett till tre gelcoatlager penslas eller sprutas på formen och tillåts gela mellan, dvs gelcoatens tillåts härdas tills den har en geléliknande konsistens men inte hård. Detta tar normalt en kvart till en halvtimme beroende på blandningen av härdare och accelerator och omgivningens temperatur.
3. Som närmsta lager mot gelcoatens lamineras ett eller några lager med tunn skyddande ytmatta av tex C-glas.
4. Vått-i-vått lamineras sedan glasfibermatta eller glasfiberväv tills tillräcklig laminattjocklek har uppnåtts.

5. Kärnmaterialet pressas mot det våta laminatet.
Man kan antingen låta laminatet under kärnmaterialet härda eller direkt laminera på laminat på andra sidan även om det kan vara fördel att låta laminatet först härda medan man manuellt kan pressa på kärnmaterialet. Eventuella ojämnheter kan även slipas ner på kärnmaterialet (förutsatt att inte är honeycomb) och eventuella hålrum spacklas igen med harts utblandad med mikrobällor innan nästa laminat läggs på.
6. Glasfibermatta eller glasfiberväv lamineras på tills tillräcklig laminattjocklek har uppnåtts.
7. Ett eller några lager tunn ytmatta (av tex C-glas) lamineras på vått-i-vått för att ge en jämnare yta och skydda laminatet.
8. Laminatet tillåts gela innan topcoaten slutligen penslas eller sprutas på, något eller några lager beroende på krav av skydd. Topcoaten tillåts gela mellan lagrena, dock inte genomhärda då topcoaten innehåller vax som gör att nästföljande lager inte fäster om topcoaten har härdat.

8.2 Sprutning

Vid sprutning av laminat, blandas plasten (vanligtvis polyester) successivt i ett munstycke och sprutas mot formen samtidigt som glasfiberroving rullas fram och huggs till fiberstumpar i en s.k. fibercutter för att sprutas mot laminatet tillsammans med plasten. Se skissen nedan.



Efter att plast och fiber har sprutats på formen måste laminatet pressas ut för att undvika luftinneslutningar och ge en jämnare yta. Detta görs på samma sätt som vid handläggning med hjälp av en metallroller.

Metoden gör det möjligt att snabbt bygga upp laminat och enkelt variera laminattjockleken mellan olika platser i laminatet. Laminatet får dock låg fiberhalt och begränsade mekaniska egenskaper.

Arbetsmiljön blir dessutom dålig med stor risk för att våt plast och fiber hamnar där den inte skall och stora mängder styren avdunstar i luften. Metoden kan dock robotiseras.

Sprutning är en vanlig lamineringsmetod vid uppbyggnad av båtskrov och liknande, ofta större laminat som byggs i mindre till medelstora serier.

8.3 Pre-preg

Pre-preg innebär att vävar förimpregnerade med härdplast utnyttjas. Det handlar ofta om vävar med högprestandafibrer som kolfiber som är impregnerad med varmhärdande epoxi.

Härdningsprocessen påbörjas då laminatet värms upp, vanligtvis till 80-150°, varvid laminatet härdar snabbt på mellan några minuter och några timmar. Eftersom den förimpregnerade epoxin härdar även i rumstemperatur, men då mycket långsamt, förvaras pre-preg-vävar i frysutrymmen där hållbarheten ökas till några månader.

Pre-preg-lamineringsmetoden har den stora fördelen att man har lång tid på sig att lägga ut vävar i exakt de skikt och riktningar som krävs för att åstadkomma ett maximalt högprestandalaminat. Metoden innebär även arbetsmiljövinster då den som laminerar inte behöver komma i kontakt med stora mängder flytande lamineringsplast och slipper riskera att slabba ner sig eller arbetsplatsen.

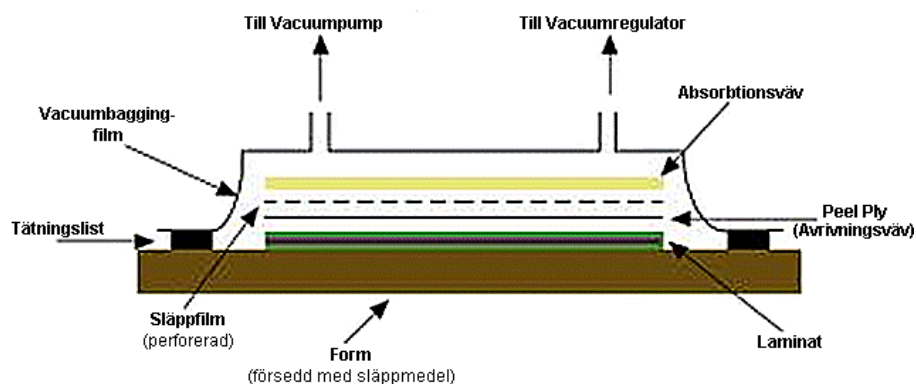
Pre-preg-vävar innehåller ofta låg plasthalt vilket gör att det finns risk i laminat lagda i flera skikt med pre-preg-vävar inte binds samman och blir homogena utan att det blir luftinneslutningar mellan vävarna. För att undvika detta kombineras ofta pre-preg-laminering med någon metod för att hålla samman laminatet under härdningen och få bort luftinneslutningar, vanligtvis vakuumbagging. På detta sätt åstadkoms starka, styva laminat med mycket hög fiberhalt (kring 70%).

8.4 Bagging

Bagging är en lamineringsmetod där det härdande laminatet täcks med en plastfilm varefter laminatet pressas ut genom vakuum eller övertryck.

Vakuumbagging är den vanligare metoden.

Den schematiska bilden nedan visar principen:



Fiberlaminatet lamineras på en form försedd med släppmedel. Ovanpå laminatet placeras en Peel-Ply-väv (avrivningsväv), en tunn väv av tex polyamid. Ovanpå placeras en perforerad släppfilm tillverkad av en "hal" plast som polyeten. Släppfilmen separerar laminatet från absorptionsväven som placeras på härnäst, en väv eller matta som senare skall suga upp en del av plasten i laminatet för att laminatets plasthalt skall minska och därmed fiberhalten öka. Därefter placeras en tät vakuumbaggingfilm över formen. Tätningsslistor utmed formens sidor tätar "påsen" över laminatet och formen.

Luften sugas därefter ut från "påsen" över laminatet med hjälp av en vakuumpump. Laminatet pressas då mot formen med på upp till 100kg/dm^2 , eventuella luftbubblor pressas bort och överflödigt plast pressas in i absorptionsväven.

Laminatet tillåts härda, antingen i rumstemperatur eller under förhöjd temperatur.

Vakuumbagging är en vanlig metod vid uppbyggnad av enstaka laminat där det finns krav på hög hållfasthet och jämn kvalitet. Metoden används med alla armeringsfibrer och lamineringsplaster, både vid handläggning och Pre-preg-laminering.

Vakuumbaggingmetoden kan anpassas på olika sätt beroende på kraven, utseendet på formen, laminatet och konstruktionen samt tillgången på verktyg som vakuumpump och specialmaterial som Peel-Ply-väv och absorptionsväv.

Genom en enklare metod där enbart plastfilm av polyeten spänns över formen och tätas genom att tejpas utmed kanterna mot formen, där undertrycket skapas med dammsugare istället för en vakuumpump kan laminat vakuumbaggas med relativt gott resultat. Dammsugaren bör dock vara av en typ som klarar av att köras utan att kylande luft sugas förbi motorn, tex en centraldammsugare eller industridammsugare.

Bagging med övertryck sker på ett liknande sätt men istället för att pressen av laminatet sker med vakuum så åstadkoms pressen genom övertryck. Detta vanligtvis genom att en påse eller ballong blåses upp i en sluten form varvid laminatet pressas ut mot formen. Bagging med övertryck medger högre tryck på laminatet och därmed högre fiberhalt än vid vakuumbagging men ställer samtidigt betydligt högre krav på att formen är grovt dimensionerad för att hålla emot trycket.

8.5 Värmehärdning

De vanligaste typerna av lamineringsplast är anpassade för att härda i rumstemperatur. Ofta ökar dock plastens och laminatets mekaniska egenskaper om temperaturen kring laminatet höjs under härdningen. Detta gäller speciellt för epoxi- och vinylesterlaminat. Dessutom går härdningen betydligt snabbare och tillverkningen kan därför bli betydligt mer tidseffektiv.

Vid värmehärdning av rumstemperaturhärdande plast höjs normalt temperaturen till först kring 50°C för att vid ett senare skede höjas till mellan 70°C och 120°C .

Lamineringsplast anpassad för värmehärdning härdas vid en högre temperatur – upp mot 180°C .

Uppvärmningen av laminat vid värmehärdning kan ske på olika sätt:

- **Uppvärmning lokal** – hela lokalen där laminatet befinner sig värms upp. Lämpligt vid värmehärdning av stora laminat i mindre lokaler som klarar av och kan tempereras till erforderlig temperatur. En vanlig bastu (utan fukt) kan fungera som en tillfällig lokal för värmehärdning.
- **Ugn** – en specialanpassad ugn som klarar stora laminat eller vanlig köksugn vid laminering av riktigt små laminat. Vid laminering i köksugn föreligger dock risk att temperaturen blir för hög varvid laminatet kan skadas.
- **Provisorisk ugn** – en låda som byggs upp kring laminatet av masonit, kartong eller liknande och värms upp tex med en värmebläkt. Ett enkelt och



- billigt sätt att värmehärda små till medelstora laminat.
- **Lokal uppvärmning** – värme tillförs direkt på det härdande laminatet med tex värmefläkt. Lämpligt vid lokala reparationer och liknande där man inte vill eller kan värma upp hela konstruktionen. *Prisvärda lämpliga värmefläktar (2kW)*
 - **IR-uppvärmning** – uppvärmning av laminat med hjälp av IR-värme som kan tränga in i laminatet på ett bättre sätt än en värmefläkt och inte utsätter laminatet för onödig lufttillförsel och uttorkning. Hålls på samma platts eller sveps över laminatet.
 - **Uppvärmning av formen** – genom värmeslingor eller liknande värms formen upp och därmed laminatet. En metod som ger bra möjligheter till styrning av värmen och kontroll men kostsam uppbyggnad av formen.

För enklare värmehärdning av rumstemperaturhärdande lamineringsplast, krävs normalt ingen avancerad temperaturreglering så länge temperaturen håller sig under den maximalt tillåtna. Redan en begränsad temperaturhöjning vid tex härdning av epoxilaminat kan ge avsevärda förbättringar av laminatets egenskaper.

En digital ugnstermometer med extern sensor kan tex fungera som sensor medan temperaturen styrs manuellt genom att värmen kontrolleras då och då under de timmar som härdningen pågår.

9 Formar

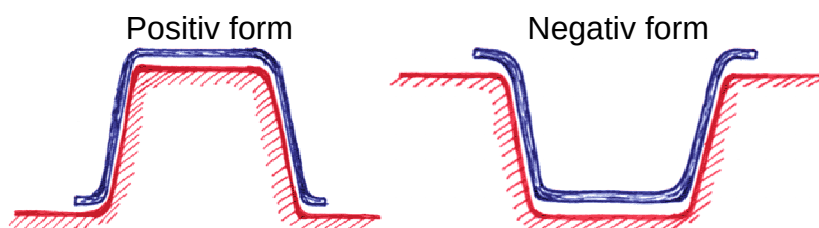
För att laminera en konstruktion i fiberarmerad plast krävs någon typ av form som laminatet kan vila mot medan hartsen härdar. Formen styr laminatets utseende och ytfinish. Framtagande av formen eller de formar som krävs för fiberkompositkonstruktionen är därför viktiga för att slutresultatet skall bli bra.

Ofta är framtagandet av formen eller formarna den största delen av arbetet vid konstruerande i armerad härdplast, speciellt vid enstaka exemplar eller mindre serier då formen eller formarna bara används en, eller några enstaka gånger.

Formar kan konstrueras på många olika sätt och ofta finns varken något ”rätt” eller ”fel” sätt, huvudsaken är att slutresultatet, dvs fiberkompositkonstruktionen blir som den är tänkt och helst till minsta möjliga kostnad och utvecklingstid.

9.1 Typer av formar

Det finns två huvudtyper av formar: **Positiva (hanformar)** och **negativa (honformar)**:



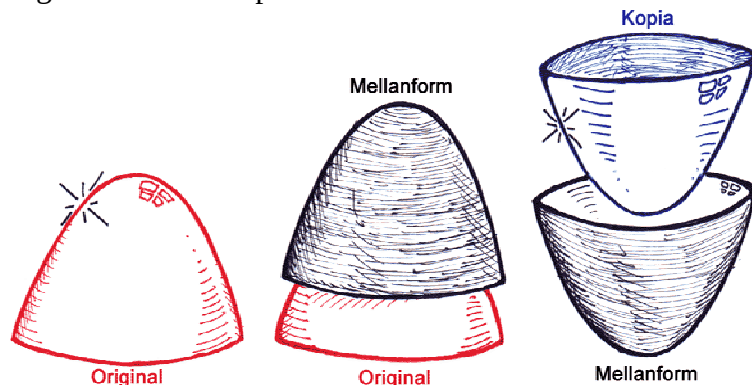
Ovanstående bilder gäller om yttersidan på det skålformade laminatet även är utsidan för den slutgiltiga konstruktionen. Vid laminering i negativ form är laminatet närmst mot formen även

utsidan för konstruktionen medan vid laminering på positiv form är laminatet närmst formen med insidan på formen insidan på konstruktionen.

Därmed krävs minimalt efterarbete vid laminering i negativ form förutsatt att ytfinishen på formen är tillräcklig. Att laminera i negativ form är därför alltid att föredra om tillräcklig ytfinish kan åstadkommas på formen. Detta gäller speciellt om formen skall utnyttjas flera gånger

Utnyttjande av mellanform

Om man har ett original som skall "kopieras" och ytfinishen på originalet är tillräckligt kan man utnyttja originalet som positiv form för att laminera en mellanform som sedan fungerar som negativ form för kopian. Se bilden nedan.



Kopiering av original genom att utnyttja mellanform

Om lamineringsarbetet utförs korrekt blir utseendet, ytfinishen och måtten på kopian desamma som för originalet.

Observera att gelcoat eller oarmerad harts bör läggas på om ett till tre skick mellan formarna och laminatet. Skikten tillåts gela innan laminatet läggs på. Detta för att garantera hög ytfinish och att fiberstrukturen inte syns igenom. Detta gäller både för mellanformen och kopian.

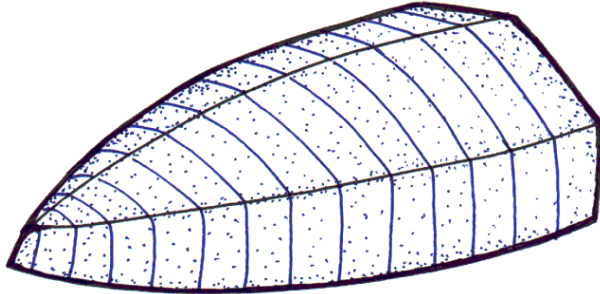
9.2 Tillverkning av formar

Vid tillverkning av formar styrs materialvalet och tillverkningssättet av formen på den slutgiltiga konstruktionen, kravet på ytfinish, krav på måttstabilitet och hur formen skall utnyttjas, dvs vilken lamineringsmetod som skall utnyttjas. Om laminatet enbart skall handläggas är kravet på styrka för formen låga medan om laminatet skall laminerat genom bagging med övertryck är kraven på styrka och styvhet betydligt högre.

Exempel på olika sätt att ta fram formar:

Cellplastform

Formen tas fram i en lättbearbetad billig cellplast som polystyren (Frigolit) tex genom skivor som skärs ut med värme och sedan limmas samman och slipas. Se bilden nedan:



Exempel på framtagning av båtskrov genom cellplastform

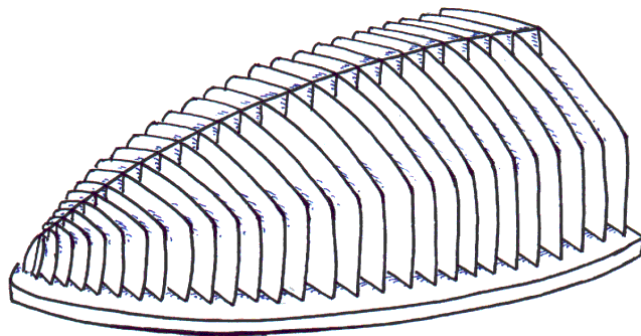
Cellplastformen spacklas med lämpligt spackel. Om polystyren utnyttjas krävs att spacklet antingen saknar lösningsmedel eller att ytan först förseglas med epoxy, lösningsmedelsfri färg eller lösningsmedelsfritt spackel (tex betongspackel).

Masonitform

Masonit, wellpapp eller, tunn plywood utnyttjas för att spännas upp och antingen tejpas eller limmas samman utmed kanterna. Lämpligt för formar med raka eller svagt böjda sidor.

Tvärskivor

Formen byggs upp genom att tvärskivor sågas ut i masonit, spånplatta eller annat lämpligt material och sedan fäst samman för att bilda ett skelett. Se bilden nedan.



Exempel på framtagning av båtskrov genom form uppbyggd med parallella tvärskivor

Tråd sträcks sedan mellan tvärskivorna varefter nät spänns över som spacklas med gips eller spackel.

9.3 Utnyttjande av formar, tips

Generella tips:

Släppmedel

Vid alla gjutningar i form förses ytan på formen med släppmedel, vanligtvis polyvinylalkohol ett filmsläppmedel som penslas eller sprayas på och som bildar en tunn genomskinlig film som är vattenlöslig men inte löses upp av hartsen.

Vax

Vid laminering i negativa formar där kraven på ytfinish är höga vaxas ytan innan den beläggs med släppmedel. Vaxskiktet minskar även risken för att laminatet kan fastna i formen om släppmedlet skulle skadas. Det förekommer speciella formvaxer baserade på carnaubavax som av många anses som det bästa vaxet för uppgiften även om vanlig bil- eller båtvas många gånger duger eller ger lika bra resultat.

Gelcoat

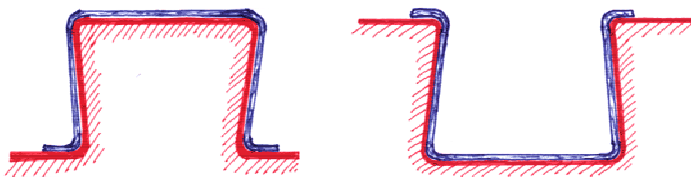
Vid utnyttjande av negativ form förses ytan närmst formen vanligtvis med gelcoat med en tjocklek av 0,5-1mm för att ge en god ytfinish utan efterarbete och för att skydda laminatet mot vatten, mekanisk åverkan och UV-ljus. Gelcoat penslas eller sprayas på med 1-3 lager som tillåts gela mellan.

Topcoat

Normalt penslas eller sprayas topcoat på alla synliga ytor på ett laminat efter att det har gelat för att ge bättre finish och skydda laminatet. Undantaget är i de fall när positiv form utnyttjas med där ytan skall slipas och spacklas innan laminatet är klart.

Vinklar på form

Vinklarna på en form måste vara sådana att det är möjligt att avlägsna det härdade laminatet. Väggarna bör luta åtminstone svagt åt det håll som laminatet avlägsnas. Skissen nedan visar exempel på formar med felaktiga vinklar.

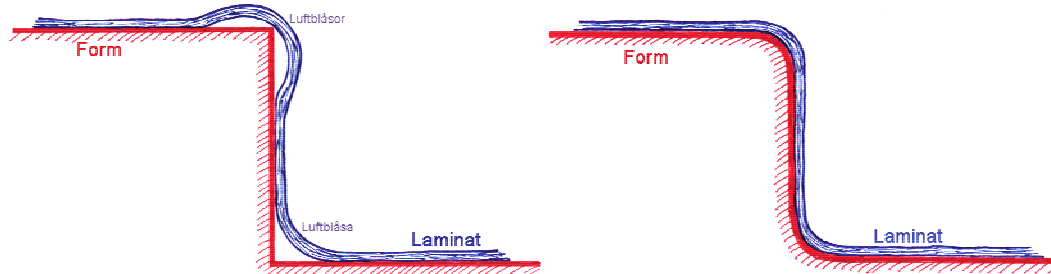


Formar med felaktiga vinklar som omöjliggör att avlägsna härdat laminat

Detta är extra viktigt om laminat med epoxi som matris lamineras i formen då epoxin riskerar fästa relativt bra även vid en form försedd med släppmedel, samtidigt som laminatet ej krymper vid härdningen i någon större omfattning.

Avrundade hörn

Alla hörn på formen bör vara avrundade då det inte är möjligt att sträcka en fiberväv eller matta över skarpa hörn utan att luftblåsor riskerar uppkomma. Se skissen nedan.



Schematisk skiss på hur det kan se ut då laminat läggs över skarpa hörn

Kravet på avrundning beror på vilken fiberutformning som utnyttjas och lamineringsmetoden. Grova vävar kräver större radier på hörn än fina mattor och lamineringsmetoder där laminatet pressas mot formen som vakuumbagging minskar kravet på avrundning av hörn.

Småtips:

Man bör inte ta ut laminatet ur formen för tidigt, då laminatet tillsynes har härdat men fortfarande är något mjukt. Detta gör att laminatet kan deformeras och därefter sluthärdas med den deformerade formen varvid konstruktionen riskerar bli förstörd. Om man inte är säker på om laminatet har genomhärdat bör man vänta ytterligare några dygn eller efterhärda laminatet med förhöjd temperatur kring 50°C -100°C i några timmar och sedan låta laminatet svalna innan det tas ur formen.

Då man laminerar över positiv form och måste slipa ner laminatet för att få tillräcklig ytjämnhet innan laminatet målas bör man inte slipa på laminat där fiber ingår utan först spackla laminatets yta rejält med ett lättslipat polyester- eller epoxyspackel. Slipdamm av glasfiber är stickande, likaså kolfiberdamm, och vid slipande av spackel utan fiberarmering slipper man det stickande dammet. Därtill försämras hållfastheten för laminatet om delar av fibrerna slipas av, vilket är speciellt viktigt om man använder väv där man har beräknat erforderlig fiberlängd i olika riktningar.

Om man har laminerat ett kolfiberlaminat över en positiv form och vill bibehålla kolfiberens karakteristiska utseende och därmed inte vill spackla ytan kan man istället förse ytan med några lager optiskt klar lamineringsepoxi som tillåts härda något mellan lagrena dock ej genomhärda.

Genom att placera den tillblandade epoxihartsen i frysen (och lämna kvar penseln i kärlet) och ta fram den vid påpenslingarna behöver man inte blanda till ny epoxi varje gång. I frysen förlängs potlifen för rumstemperaturhärdande epoxi från någon halvtimme till några dygn. Epoxin är trög direkt efter den har tagits ut från frysen men blir flytande då den värms upp till rumstemperatur.

Man bör undvika helt plana laminat om inte sandwichkonstruktion utnyttjas. Ett plant laminat kan slå sig då plasten krymper vid härdningen (gäller speciellt polyester och vinylester) samtidigt som fibrerna inte krymper i samma omfattning.

En enkel- eller dubbelbuktad yta alternativt korrugerad form ger ett betydligt styvare laminat vid samma dimensioner och dessutom mindre risk för krympdeformation.

9.4 Från form till konstruktion

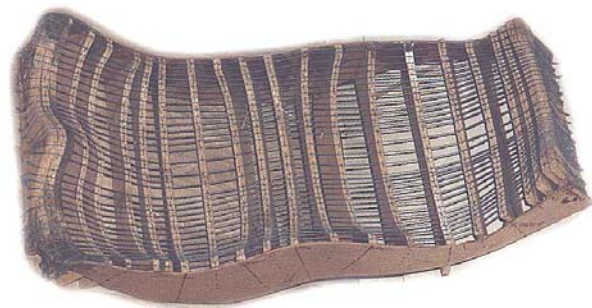
För att åskådliggöra hur det kan se ut då man tar fram en konstruktion i fiberarmerad härdplast genom olika typer av former återger jag här hur jag tog fram bakkåpan / packlådan till en kolfiberliggcykel jag konstruerat i kolfiberarmerad epoxy. Se fotot nedan.



Kolfiberliggcykeln med bakkåpan

① Förs togs formen för stolen fram.

Den gjordes enligt metoden med tvärgående skivor. Skivorna sågades ut ur spånplatta och placerades med några centimeters mellanrum mellan två masonitskivor. Tråd spändes sedan mellan spånplatteskivorna mha häftpistol



Stolsformen med tvärgående skivor och tråd mellan skivorna



Slipad och polerad positiv stolsform

② Över trådarna laminerades sedan polyester armerad med glasfibermatta. Ytan spacklades och slipades tills tillräcklig ytjämnhet och finish hade uppnåtts.



Den positiva stolsformen sedd underifrån

③ I den positiva formen laminerades en mellanform i polyester armerad med glasfibermatta. Mellanformen fungerade som negativ form för det slutgiltiga laminatet



Mellanformen sedd från utsidan med grov ytfinish



Mellanformen sedd från den sida laminatet sedan skall läggas



Stolen lamineras, mot ytterlaminatet har kärnmaterialet pusslats på

④ Stolen är en sandwichkonstruktion med 10mm högdensitetspolystyren mellan ytterlaminat av kolfiberarmerad epoxy. Först laminerades kolfiberlaminatet närmst formen varefter kärnmaterialet nedskuret till rutor pusslades på det ohärdade laminatet. Laminatet tilläts värmehärdade varefter kärnmaterialet sandpapprades jämn och innerlaminatet laminerades på.

⑤ Därefter togs formen till bakkåpan fram. Formen gjordes i polystyren med låg densitet (Frigolit). Formen spacklades med snabbhärdande betongspackel (Husfix) som inte innehåller några lösningsmedel och därmed inte löser upp polystyrenet.





Positiv form till bakkåpan, spacklad med betongspackel och penslad med epoxy

⑦ Bakkåpan lamineras enligt samma metod som stolen med en 10mm sandwichkärna av högdensitetspolystyren mellan ytterlaminat av kolfiberarmerad epoxi. Bakkåpan lamineras i tre separata bitar, sidorna och locket som sedan sammanfogades med stolen och en ficka för bakhjulet.



Kolfiberväv till ena sidan av bakkåpan tillpassas innan laminering

Frigolitformen till bakkåpan provas tillsammans med den färdiga stolen

⑥ Eftersom bakkåpan skulle lamineras mot positiv form och ytan närmst formen hamnar på insidan av lådan var kraven på ytfinish på formen inte så höga. Efter att ha spacklats och slipat grovt penslades epoxi på formen för att få en porfri yta lämplig för släppmedel.



Delarna till bakkåpan med kärnmaterial påpuzzlat på innerlaminatet

⑧ Slutligen lamineras kolfiberväv på båda sidorna om bakkåpan och locket separat. Laminatet penslades slutligen med tre lager ren lamineringsepoxi för god ytfinish.

⑨ Efter visst efterarbete var bakkåpan klar för att hänga på liggcykeln.



Slutgiltigt resultat – komplett bakkåpa med lock påmonterat.

10 Tänka på vid fiberkompositkonstruktioner

Det är vanligt att erfarna konstruktörer som länge har konstruerat i metall tänker på ett visst sätt, men för att på ett bra sätt konstruera i fiberarmerad plast krävs det att konstruktören *”tänker i fiberarmerad plast”*, då både materialegenskaperna, konstruktionssätten och hur den specifika konstruktionen bör se ut och anpassas ofta skiljer mycket mellan vid konstruktion i armerad plast istället för metall.

Att ta fram en optimerad konstruktion i fiberarmerad plast, där dimensionerna är helt rätt, fibrerna är av rätt typ på olika platser i konstruktionen samt är placerade i rätt riktning är svårt. Om därtill tillverkningsprocessen skall optimeras för minimal tidsåtgång och minimala kostnader i förhållande till slutresultatet ökar uppgiftens komplexitet. Framtagandet av optimala eller helt optimerade konstruktioner i fiberarmerad plast är därför något som privatpersoner och mindre industrier sällan eller aldrig genomför.

Att ta fram enstaka konstruktioner i fiberarmerad plast med *tillräckliga* egenskaper kan dock vara relativt enkelt men konstruktören bör känna till materialets egenskaper, hur konstruktionen praktiskt skall genomföras och vilka felrisker det finns.

10.1 Dimensionering

Fiberriktning

I en fiberarmerad plast styr armeringsfibrerna och dess egenskaper det totala materialets egenskaper vid de flesta belastningsfall. Förenklat så blir materialets draghållfasthet och E-modul vid drag samma som de ingående armeringsfibrernas förutsatt att fibrerna är kontinuerliga och enbart är i samma riktning som för den dragande belastningen. I de flesta fall är dock fibrerna varken fullständigt kontinuerliga eller enbart placerade i den riktning som belastningen påverkar.

Materialets egenskaper är då betydligt sämre vid just den aktuella belastningen men kanske bättre vid någon annan belastning.

Det är konstruktörens uppgift att bedöma hur konstruktionen kommer att belastas. Om konstruktionen enbart belastas i en viss riktning bör en stor del av armerande fibrerna placeras i den riktningen, vilket görs med enkelriktad väv eller roving. Rent längsriktat laminat bör dock normalt undvikas då de mekaniska egenskaperna i övriga riktningar blir mycket dåliga.

Då belastningens riktning i konstruktionen är okänd eller konstruktionen belastas lika mycket i alla riktningar bör fibrerna placeras så de kan ta upp laster från alla riktningar. Detta är det vanligaste vid konstruktioner i fiberarmerad plast och även det enklaste belastningsfallet att räkna på. Laminatet konstrueras då ofta med korthuggen matta eller flerriktad väv.

En vanlig kombination är där laminat är uppbyggt med fiberriktningar men på vissa platser förstärks eller styvas upp lokalt med längsriktade fibrer.

Fiberhalt

Eftersom hållfasthetsegenskaperna för en konstruktion av armerad plast vid många belastningsfall till största del styrs av de ingående fibrerna som tar upp lasterna är även fiberhalten i den armerade plasten viktig. Fiberhalten räknas vanligtvis i viktprocent där 30 procent fiberhalt innebär att laminatet består av 30 viktprocent fibrer och 70 viktprocent matrisplast.

Ett laminat med hög fiberhalt är generellt starkare och styvare än ett laminat med samma dimensioner men med lägre fiberhalt då den totala mängden fibrer i det första laminatet är högre. Olika fibrer, fiberutformning och lamineringsmetoder ger olika fiberhalt. Generellt gäller att ju mer komplex lamineringsmetod och fiberutformning desto högre fiberhalt får laminatet och därmed högre vikt-styrkeförhållande. Ett handlagt laminat armerad med glasfibermatta ger lägst fiberhalt, kring 30%, handläggning av väv ger kring 50% fiberhalt, medan bagging eller annan pressmetod av laminat baserad på väv eller pre-preg ger upp till 70% fiberhalt. Högre fiberhalt än 70% ger dock risk för att laminatet blir för "torrt" dvs mängden matrisplast blir för liten varvid laminatet blir känsligt för bla klyvande belastning.

Det är konstruktörens uppgift att antingen anpassa fiberutformning och lamineringsmetod efter kraven och konstruktionens dimensioner eller, vilket ofta är vanligare, att konstruktionen anpassas efter den fiberhalt som den utnyttjade lamineringsmetoden och fiberutformningen ger. Fiberhalten kan beräknas genom att laminera en provbit med den metod och fiberutformning som skall utnyttjas i den aktuella konstruktionen och väga plasten, väven och det slutgiltiga laminatet. När fiberhalten är känd är det dessutom möjligt att beräkna ungefär hur mycket varje skikt med fiber bygger på tjockleken varvid man vet hur många lager man skall lägga för att laminatet skall nå lämplig tjocklek.

Tjockleken kan mätas eller beräknas genom att plastens och fiberns densitet är känd (glasfiber: ca $2,6 \text{ kg/dm}^3$, kolfiber: ca $1,7 \text{ kg/dm}^3$, aramidfiber: ca $1,4 \text{ kg/dm}^3$, matrisplast: ca $1,1 \text{ kg/dm}^3$ (polyester, vinylester och epoxi)).

En enkel fingervisning vid handläggning är att laminat armerad med 450 gr/m^2 glasfibermatta bygger ca 1mm per lager och något tunnare om laminatet packas. Motsvarande glasfiberväv bygger kring 0,5mm om laminatet packas och motsvarande längsriktad väv ytterligare något tunnare pga möjlighet till högre fiberhalt.

Sandwich

Vid sandwichkonstruktioner blir laminatet ofta så styvt och starkt att det snarare är tryck- och slagttåligheten hos laminatet som styr vid dimensionering än laminatets hållfasthetsegenskaper. Dimensionerna anpassas då efter hur mycket tryck- eller punktblastning sandwichkonstruktionen utsätts för på olika platser. På vissa platser där laminatet kan utsättas för extra stora punktblastningar, infästningar och liknande låter man laminatet antingen övergå till enkellaminat eller byter ut kärnmaterialet till ett hårdare material som i större omfattning står emot tryck. Det kan vara hårt trä eller glasfiberarmerad plast.



Exempel på hur ett sandwichlaminat övergår till enkellaminat

Punktblastning

En stor skillnad mellan konstruktion i metall och armerad plast är att metall generellt tål betydligt mer punktblastning. Detta blir speciellt tydligt i kompositkonstruktioner armerade med ytterst starka fibrer som kolfiber. Styrkan och styvheten för kolfiberlaminat överstiger ofta motsvarande konstruktion i tex stål men vid punktblastning skadas materialet lätt. Detta gäller speciellt laminat med hög fiberhalt som vid punktblastning lätt delaminerar. Vid tex infästningar och liknande partier som utsätts för stora punktblastningar bör därför laminatet överdimensioneras rejält eller så kan lämpliga metalldelar plastas in för att på det sättet fördela belastningen över en större yta av laminatet. Metallbitar som plastas in bör anpassas till formen så att laminatet har möjlighet att omsluta rejält för att minimera risken för att metallbiten släpper. Metallplattor som skall plastas in perforeras med hål så att laminatet har möjlighet att binda samman på båda sidorna av plattan.

Lämpligt material är aluminium, stål eller titan, metaller som är relativt lätta att limma. Undvik metaller som är svårlimmade (hög ytspänning) som tex rostfritt stål.

10.2 Felrisker och vanliga fel

Vid konstruktion i fiberarmerad plast ingår vissa moment som är känsliga och om de genomförs på ett felaktigt sätt äventyras egenskaperna för hela kompositkonstruktionen. Ofta är uppkomna fel dessutom svåra eller omöjliga att rätta till utan leder till att hela konstruktionen måste kasseras. Det är därför av högsta vikt att konstruktören känner till de vanligaste felen och felriskerna och försöker undvika dessa.

Felaktiga blandningsförhållanden

Om härdaren och hartsen och eventuell accelerator blandas i felaktiga proportioner kan laminatet antingen bli dåligt genomhärdat och gummiliknande med kraftigt försämrade hållfasthetsegenskaper (speciellt stor risk med epoxi) eller laminatet härdar för snabbt varvid den snabba exoterma reaktionen ger upphov till att temperaturen stiger snabbt och det



*Lämplig elektronisk
brevvåg / köksvåg*

finns risk för att laminatet spricker eller mikrosprickor uppstår (speciellt stor risk med polyester eller vinylester).

För att vara säker på att blandningsförhållandena blir rätt bör därför delarna antingen vägas med en noggrann våg, tex en elektronisk brevvåg om mindre mängder lamineras eller speciella pumpar som saluförs av plastleverantörerna utnyttjas.

Dålig blandning

Om hartsen och härdaren inte blandas till ordentligt finns risk för samma typ av problem som vid tillblandning av felaktiga proportioner. För att vara extra säker på att plasten har blandats till väl och inte riskera oblandade bottenrester i kärl som sedan används vid lamineringen kan man flytta över plasten från tillblandningskärl till nästa och fortsätta blandningen där.

Trots att plasten skall blandas väl bör man undvika att vispa den då det kan blandas in luftbubblor. Lämplig verktyg att blanda med är en trästicka vid mindre mängder och blandarverktyg fäst på bormaskin vid blandning av större mängder. Eventuella luftbubblor som ändå kan uppstå undviks då plasten tillåts stå någon minut innan man börjar laminera med den.

Fel fiber till plasten

En felkälla kan vara att fibern inte är anpassad till den harts den skall armera. Det innebär att fibern inte är sized för den plast som utnyttjas, eller att fiberns binds med ett bindemedel som inte löses upp av plasten vid lamineringen. Matrisplastens vätningsförmåga på fibrerna försämras och därmed minskas plastens möjlighet att korrekt binda samman fibrerna varvid kompositens hållfasthet kan försämras avsevärt.

Ett tecken på att fibern innehåller ett bindemedel som inte plasten förmår lösa, vilket tex är fallet då man försöker laminera korthuggen glasfibermatta med lösningsmedelsfri epoxi, är att det märks tydligt att väven inte förmås vätas och att laminatet blir grumligt.

Lokal

En felkälla är att konstruktionen lamineras i en felaktig lokal. Den omgivande temperaturen kan vara för låg varvid laminatet inte tillåts genomhärda korrekt. Fuktigheten kan vara för hög varvid dagg uppstår på laminatet vilket kan medföra att vatten eller fukt innesluts i laminatet, något som ger stor risk för dålig hållfasthet, delaminering och degradering med tiden. Vid en lägre temperatur sjunker daggpunkten, dvs den temperatur då fuktigheten i luften bildar dagg på ytor. Fibrer och andra lamineringsprodukter bör förvaras torrt för att egenskaperna inte skall försämras och de skall vara torra då de lamineras. Hartsen bör stå kallt för att få så lång brukbar livslängd som möjligt då all harts härdar eller torkar med tiden. Generellt har epoxiharts längre brukbarhet än polyesterharts. Om epoxihartsen har kristalliserats vilket kan ske efter en tid kan man värma upp hartsen något varvid den återgår till sin ursprungliga flytande form.

Dåligt underarbete

Ett vanligt fel vid limning och laminering på härdat laminat och andra ytor är att ytorna inte förbehandlas rätt. Generellt skall alla ytor som limmas eller lamineras vara väl rengjorda från alla rester av smuts och fett. Detta är speciellt viktigt om epoxi utnyttjas som inte innehåller några lösningsmedel som löser eventuellt smuts eller fett. Ytorna rengörs med vatten och fettlösningsmedel som inte lämnar några rester. Aceton är ofta lämpligt men om ytorna som rengörs är känsliga kan istället T-sprit eller svagare lösningsmedel utnyttjas. Observera att framförallt aceton inte bara löser fett på de föremål som skall rengöras utan även det naturliga fett som förekommer i huden och är vid hudkontakt starkt uttorkande. Hudkontakt bör därför undvikas.

Ytor som skall lamineras eller limmas bör dessutom vara grovslipade för att hårdplasten skall ha maximal möjlighet att fästa.

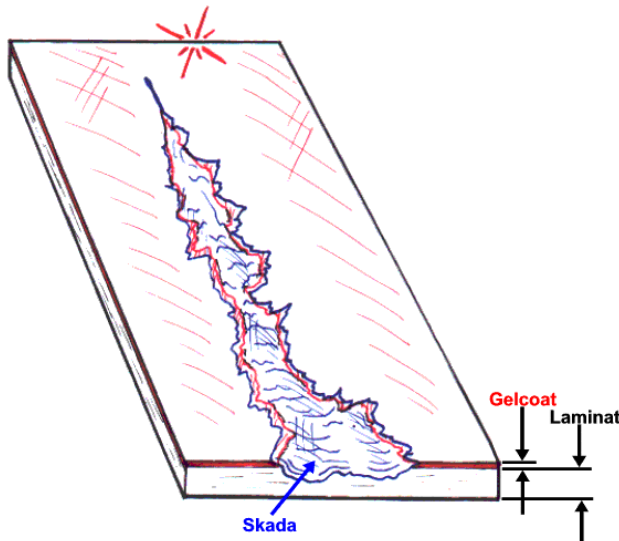
11 Reparation

De reparationer som kan komma ifråga med armerad hårdplast är främst i fiberarmerade laminat men även i andra material som trä och metall. Flexibiliteten är hög och metoderna enkla vilket gör det till ett vanligt alternativ. Reparationer med armerad hårdplast är ofta tidskrävande men kräver sällan specialverktyg eller specialkunskap vilket gör dem lämpliga för privatpersoner att utföra istället för att låta en reparatör eller verkstad genomföra reparationen.

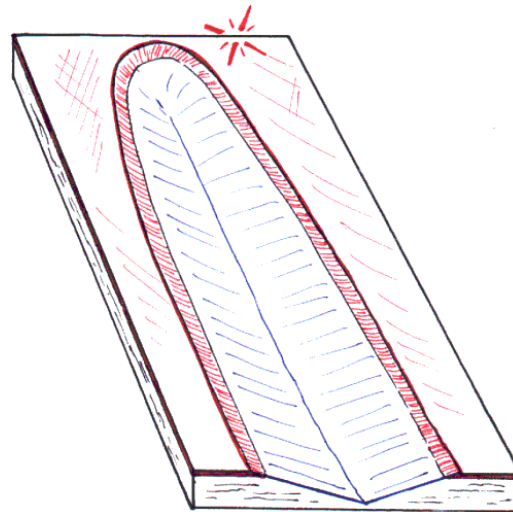
11.1 "Standardskada" i laminat

Glasfiberarmerad polyester, båtskrov och liknande:

① Skada i glasfiberlaminat med gelcoat, tex båtskrov:



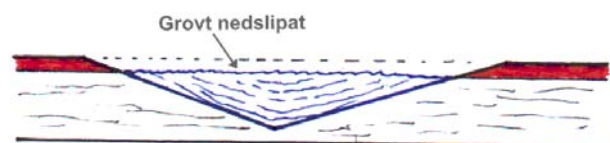
② Skadan slipas jämn:



③ Den slipade skadan tvättas ren med aceton, glasfibermattor lamineras sedan med polyester i "gropen" till samma nivå som det ursprungliga laminatet:



④ Efter att det nya laminatet har härdat slipas det ner till samma nivå som den undre gelcoatnivån på det gamla laminatet, ca 1mm under den slutgiltiga nivån:



⑤ Ytan tvättas ren med aceton, varefter polyesterbaserat gelcoatspackel med samma färg som den ursprungliga gelcoaten läggs på ytan, med ungefär 2mm tjocklek:

⑥ Efter att spacklet har härdat vattenslipas ytan till samma nivå som den omgivande gelcoaten för att sedan poleras och helst vaxas:



Kommentar, gelcoatspackel:

Välsorterade båtillbehörsfirmor saluför gelcoatspackel baserad på polyester i många kulörer. Om en skada i laminatet på en båt skall repareras finns det möjlighet att det säljs gelcoatspackel som färgmässigt stämmer med den ursprungliga färgen, något som affären eller tillverkaren bör kunna upplysa om.

Om färgen på det nyhårdade gelcoatspacklet inte riktigt stämmer med den ursprungliga färgen på den omgivande gelcoaten trots att spacklet enligt tillverkaren skall stämma kan det bero på att den omgivande gelcoaten har blekts eller gulnat efter långvarig exponering av solljus. Färgskillnaden bör minska med tiden då den nya gelcoaten utsätts för solljus.

Om det inte saluförs gelcoatspackel med rätt färg kan man blanda i pigment i gelcoatspackel med en närliggande grundfärg. Det är dock svårt att få perfekt färgresultat.

11.2 Hål i laminat

Laminat av glasfiberarmerad polyester, båtskrov eller liknande.

Litet hål

Skadan repareras på samma sätt som i beskrivningen kring reparationen av ”standardskadan” med den skillnaden undersidan av det skadade laminatet täcks med grov tape, kartong, en platta eller liknande då glasfibermattorna lamineras på. Om man inte kan komma åt från undersidan kan man använda en flexibel platta av tex gummi eller mjuk plast som träs in genom hålet och hålls kvar genom att spännas upp med trådar som hålls framifrån tills det nya laminatet har hårdnat. Trådarna klipps sedan av då laminatet grovslipas innan gelcoatspacklet läggs på.

Stort hål

Vid reparation av stora skador kan det krävas det nya glasfiberlaminatet tillåts överlappa det gamla laminatet från undersidan med några centimeter till någon decimeter (beroende på skadans storlek och laminatets tjocklek) Detta för att undvika att sprickor uppstår i gränsen mellan det nya och gamla laminatet. Den yta på undersidan där det nya laminatet skall läggas skall slipas grovt och rengöras väl med aceton innan lamineringen.

En provisorisk platta eller form som har försetts med släppmedel (polyvinylalkohol) placeras från framsidan vid lamineringen.

I övrigt utförs reparationen enligt beskrivningen kring reparationen av ”standardskadan”.

Om skadan utsätts för extra stora påfrestningar och det finns risk för att sprickor uppstår i skarven mellan det gamla och nya laminatet eller det ej är möjligt att överlappa det gamla laminatet så mycket kan det krävas att glasfibern lamineras med epoxi istället för polyester för att öka vidhäftningen mellan det gamla och nya laminatet samt öka hållfastheten hos det nya laminatet. Då föreligger dock risk att gelcoatspackel baserad på polyester inte fäster lika bra.

Gelcoatspackel baserad på epoxi bör normalt undvikas om laminatet utsätts för långvarig exponering av solljus då epoxin bryts ner snabbare än polyester av UV-ljus.

Ett alternativ till gelcoat är då en lämplig lack, billack, tvåkomponents polyuretanlack eller annan typ av lack beroende hur mycket solljus och vatten som den reparerade ytan kommer att utsättas för.

11.3 Sandwichlaminat

Reparation av skador som enbart går genom det yttre laminatlagret och inte så stor del av kärnmaterialet har skadats utförs enligt beskrivningen av "standardskadan".

Kontrollera först att kärnmaterialet inte löses upp av plasten om polyester eller vinylester används (innehåller lösningsmedlet styren). Då krävs det att ytan på kärnmaterialet förseglas, antingen med lösningsmedelsfri epoxi eller snabbhärdande polyesterspackel (om kärnmaterialet klarar kortvarig exponering av styren).

Om skadan i kärnmaterialet är djup bör "gropen" spacklas igen med tex plast utblandat med fyllmaterial, förslagsvis mikrobällor, vilket bildar ett lättslipat spackel med låg densitet. Om hålrummet är mycket stort och kärnmaterialet inte utsätts för stor belastning kan utrymmet alternativt fyllas med enkomponents polyuretanskum (fogskum).

Vid skador i sandwichlaminat som går rakt igenom båda ytterlaminaten och kärnmaterialet krävs det att sidorna repareras separat från varje håll. Reparationerna bör kunna utföras enligt reparationen av "standardskadan" med det undantag att det eventuellt inte är nödvändigt att förse baksidan med gelcoatpackel.

Hålrummet i kärnmaterialet fylls igen med mikrobällorpackel eller polyuretanskum.

Reparationer av skadat sandwichlaminat med mycket tunna laminatsidor, som tex i en surfingbräda är svåra att genomföra med gott resultat. Det kan krävas att glasfibermattan pressas delvis under ytterlaminatet som repareras för att ge tillräcklig fästytta för det nya laminatet.

11.4 Delaminering av sandwichlaminat

Båtdäck med sandwichlaminat kan efter ett tag på vissa platser delaminera, dvs ytterlaminaten släpper från kärnmaterialet. Laminatet förlorar då en stor del av sin styvhet och hållfasthet.

Felet upptäcks genom att däckets sviktat då man går över det och om man knackar är ljudet annorlunda än på de delar av däckets där sandwichlaminatet inte har delaminerat.

Reparationen kan ske genom att epoxi sprutas in till kärnmaterialet enligt följande:

1. Delaminerade partier av skrovet rekognoseras.
2. Man borrar små hål från ovansidan med några centimeters mellanrum. Hålen skall vara så stora att spetsen till injiceringsprutan får plats.
3. Däcket kring hålen skyddas med tape.
4. Lågviskös epoxi, tex lamineringsepoxi injiceras genom hålen tills däckets är mättat.
5. Skrovet tyngs ner med tyngder, tex. stora stenar för att ytterlaminatet skall tryckas mot kärnmaterialet och däckets inte bukta. En del av epoxin kan komma upp ur hålen.
Kontrollera att inte epoxi rinner ut någonstans på undersidan av skrovet! Eventuella hål måste täppas igen.
6. Epoxin tillåts härda, helst under något förhöjd temperatur.
7. Tejpen tas bort och ytan slipas.
8. Slutligen målas ytan med lämplig färg och eventuell halkskyddsmatta eller liknande limmas på.

Reparation kan även ske från undersidan av däckets om det undre ytterlaminatet har släppt från kärnmaterialet. Detta är dock svårare. Det krävs att hålen tejpas igen omedelbart för att epoxin inte skall rinna ut ur hålen. Dessutom är det svårt att pressa ytterlaminatet mot kärnmaterialet på samma sätt som vid reparation från ovansidan.

11.5 Trä

Vid reparationer av trä kan ofta armerad hårdplast med fördel utnyttjas.

Epoxi är för många ändamål det bästa limmet för trä och ger starka fogar som är helt okänsliga för vatten. Trä kan även förseglas med epoxi för maximalt fuktskydd, ofta armerad med en tunn glasfiberväv för att ge tjockare skikt och bättre tålighet. Ren optiskt klar epoxi är dock relativt känslig för UV-stålning och bryts ner vid långvarig exponering av solljus varvid epoxin gulnar och skiktet blir matt. Bäst är att belägga ytan med en lämplig färg, tex polyuretanfärg. Om klarlack skall utnyttjas för att ge möjlighet att se trät igenom epoxilagret bör ytan beläggas med fennissa med UV-skyddande effekt.

Även polyester eller vinylester kan utnyttjas vid reparationer av trä även om den limmande effekten på trä är betydligt sämre än för epoxi, men pga epoxins högre pris är det ändå vanligt. Vid reparationer av trä armeras oftast polyestern eller vinylestern med glasfibermatta eller glasfiberväv.

Vid alla reparationer av trä bör trät vara så torrt som möjligt och inte innehålla rester av linolja, tjära eller liknande som annars begränsar plastens möjlighet att tränga in och fästa på trät. Ytan slipas och eventuellt rengörs med aceton. Feta träslag som teak måste alltid avfettas med aceton direkt innan limning med epoxi genomförs eller ytan beläggs med epoxi, polyester eller vinylester.

11.6 Bucklor, rosthål i stål

Även skador i metall kan repareras med armerad plast.

Ett vanligt förekommande reparationsområde är skador i bilkarosser.

Färgen kring skadan och eventuell rost avlägsnas genom sandblästring eller slipning.

Om det är en mindre grop kan det räcka att spackla igen. Det förekommer många polyesterbaserade spackel lämpade för uppgiften men epoxispackel fäster betydligt bättre och riskerar inte spricka i lika stor omfattning. Det finns även lämpliga spackel som är något flexibla vilket kan vara till fördel om området utsätts för mycket vibrationer.

Efter att spacklet har härdat vattenslipas ytan. Den reparerade ytan sprayas sedan med grundfärg och därefter lack i lämplig färg i ett antal tunna lager med några minuters mellanrum. Om det är metalliclack bör slutligen klarlack sprayas över.

Om skadan är av större omfattning eller att hål har uppstått bör plastspacklet armeras. Det förekommer polyesterspackel med viss inblandning av glasfiber för detta ändamål. Ett metallnät kan utnyttjas för att ge armerande effekt och samtidigt stödja upp lagningen medan spacklet härdar.

Det bästa sättet att utföra reparationer, med minsta risk för att sprickor uppstår är dock inte att använda glasfiberspackel utan att utnyttja lamineringsepoxi (eller eventuellt lamineringspolyester eller vinylester) som armeras med glasfiberväv, med eventuellt stöd av metallnät. Ytan spacklas och vattenslipas sedan tills tillräcklig ytjämnhet har uppnåtts och lackas enligt beskrivningen ovan.

Kolfiber som armering bör undvikas vid reparation av stål då direkt kontakt medför risk för galvanisk korrosion men även för att kolfiberlaminat blir så styva att reparationen riskerar släppa i skarven till den reparerade metallen då reparationen utsätts för vibrationer eller belastning.

11.7 Böldpest

På båtar av glasfiberarmerad polyester kan s.k. böldpest uppstå under vattenlinjen. Det innebär att glasfiberlaminatet suger upp vatten (genom osmos) varvid blåsor eller sprickor kan uppstå då trycket ökar i vatteninneslutningarna.

Förebyggande av böldpest

Båtar av glasfiberarmerad plast har vanligtvis ett millimetertjockt gelcoatskickt även under vattenytan. På gelcoaten målas normalt bottenfärg som minskar beväxning, men inte skyddar laminatet mot inträngande fukt i någon större omfattning. För att öka skyddet mot att vatten kan tränga igenom gelcoaten in till glasfiberlaminatet beläggs gelcoaten under vattenlinjen med en s.k. fuktspärr, som består av en färg eller plast med högt skydd mot vattengenomsläpp och vattenabsorbtion. Det kan antingen vara ren lamineringsepoxi, specialanpassad epoxi eller epoxibaserad grundfärg. Färgen eller plasten beläggs direkt mot gelcoaten efter att den har vattenslipats och rengjorts ordentligt med vatten och aceton. All eventuell gammal bottenfärg måste avlägsnas annars kan fuktspärren inte fästa, speciellt då bottenfärgen ofta innehåller ämnen som teflon för att minska färgens friktion.

För fullgott skydd beläggs ytan med minst 3 lager färg eller plast som antingen tillåts gela eller genomhärda (eller torka) mellan lagrena beroende på typ. Följ tillverkarens rekommendationer! Det är viktigt att laminatet tillåts torka ordentligt innan botten beläggs med fuktspärr. Det kan räcka att laminatet torkar ut under vintern men om båten inte befinner sig i ett uppvärmt utrymme kan det krävas att man väntar med arbetet och sjösättningen en bit in på sommaren. Om ett fuktigt glasfiberlaminat beläggs med fuktspärr kan fukten som normalt skulle ha torkat ut spärras in och ställa till med större problem än vad fukten skulle ha gjort i ett oskyddat laminat.

Reparation av böldpest

För att reparera en redan uppkommen böldpest i ett laminat krävs betydligt mer omfattande arbetsinsats än vid förebyggande.

Gelcoaten måste avlägsnas på alla delar av botten där skador har uppstått så att blåsorna öppnas men normalt avlägsnas gelcoaten på hela ytan under vattenlinjen. Detta kan göras med sandblåstring eller grov slipning. Botten högttryckstvättas och handtvättas sedan med rent vatten minst tre gånger.

Laminatet måste torkas ut ordentligt, helst i ett uppvärmt utrymme hela vintern eller i ickeuppvärmt utrymme under hela sommaren. Det finns fuktindikerande instrument att tillgå för att testa om laminatet har torkat.

Beroende på om laminatet är jämnt spacklas det först med epoxispackel och slipas tills ytslätheten är tillfredställande. Ytan beläggs sedan med lamineringsepoxi eller specialanpassad epoxi, minst tre lager som tillåts gela mellan lagrena, dock inte genomhärda. Om laminatlagrena tillåts härda mellan skall ytorna slipas matta och rengöras med vatten innan nästa lager påföres. Epoxin påföres så riktligt som möjligt utan att risk för rinnmärken uppstår. Fuktskyddet är i proportion till epoxiskiktets tjocklek.

Temperaturen får inte understiga 10°C då epoxiarbetet pågår och omgivningen måste vara torr så att det ej föreligger risk för dagg på den härdande epoxin. Därför bör arbetet genomföras inomhus. Epoxin bör härda i minst en vecka innan sjösättning av båten om temperaturen är 20°C och två veckor om temperaturen är 10°C.

12 Säkerhet

Vid konstruktion av armerad härdplast ingår ett antal moment som om de genomförs felaktigt kan medföra risk för personskador. Om erforderliga säkerhetsåtgärder följs innebär dock normalt hanteringen och bearbetningen inte några risker.

Nedanstående säkerhetsåtgärder gäller främst vid enstaka hantering, laminering och bearbetning av armerade härdplaster. Vid regelbunden hantering under lång tid och ren yrkesmässig hantering bör ytterligare åtgärder vidtas.

12.1 Laminering

Vid lamineringen av fibrerna är det främst hanteringen av harts, härdare och accelerator och den tillblandade hartsen som kan medföra risk för personskador.

Polyester och vinylester

Polyesterns katalysator / härdare är en giftig, etsande vätska.

Stänk kan medföra blindhet. Vid framförallt hanteringen av härdaren och tillblandning av harts bör därför skyddsglasögon användas.

Polyester och vinylester innehåller styren, ett lösningsmedel som kan vara farligt vid inandning.

Vid hantering av harts och laminering bör därför skyddsmask användas som begränsar inandningen av avdunstad styren. Lokalen bör dessutom i största möjliga mån ventileras.

Täckande skyddskläder och vantar, diskvantar eller liknande som klarar lösningsmedel (ej vinylvantar) används för att undvika hudkontakt. Härdad plast kan inte lösas upp av något lösningsmedel utan måste avlägsnas mekaniskt.

Epoxi

Härdaren till lamineringsepoxi innehåller ämnen som är irriterande vid hudkontakt och kan vara allergiframkallande. Därför är det extra viktigt att undvika hudkontakt vid hantering av ohärdad epoxi och laminering. Heltäckande skyddskläder och diskvantar är ofta tillräckligt vid enstaka hantering. Vid regelbunden hantering och för högre säkerhet finns specialvantar att tillgå hos väl sorterade epoxileverantörer. Dessa kan dock vara för ohanterliga vid finare lamineringsarbete. Slipa eller såga inte i ohärdat epoxilaminat eller i epoxilaminat där man är osäker på om laminatet är genomhärdat. Detta eftersom den epoxidammet annars riskerar irritera luftvägar något som kan medföra stor fara.

Epoxi för lamineringsbruk är normalt lösningsmedelsfri vilket innebär att den inte avdunstar. Vid laminering krävs därför normalt inte skyddsmask annat än i små oventilerade lokaler eller vid långvarig hantering.

Generellt

Då det föreligger risk för stänk– Använd skyddsglasögon!

Detta gäller både vid tillblandningen av harts och vid större lamineringsarbeten eller laminering underifrån där det finns risk för att hartsen droppar.

Vid stänk av polyester, vinylester eller epoxi i ögonen skölj omedelbart med vatten eller 2% Natriumkarbonatlösning. Uppsök omedelbart läkare.

12.2 Bearbetning

Armerad hårdplast har i förhållandevis låg densitet och vid bearbetning som slipning och sågning bildas slipdamm som flyger i runt luften och kan andas in. Vid inandning kan dammet irritera luftvägar och i lungorna medföra fara.

Man bör därför alltid använda skyddsmasker vid bearbetning av fiberarmerad hårdplast.



Två lämpliga och prisvärda masker som skyddar mot slipdamm och aerosol, utbytesfilter till den vänstra

Glasfiberslipdamm men även slipdamm från kolfiberlaminat är stickande vid hudkontakt och ger sträv hud en längre tid. För att undvika hudkontakt används tät skyddsklädsel tex arbetsoverall och täta vantar, tex diskvantar som träs över armarna på klädseln för att undvika att slipdamm kommer mellan.

Helst bör man ha lättare klädsel under som kan bytas och tvättas ofta.

Håret bör dessutom täckas.

Efter att ha varit i kontakt med slipdammet bör man duscha för att skölja av eventuellt damm som har nått huden och som annars kan irritera.

Kläder som har kommit i kontakt med slipdammet bör inte tvättas tillsammans med vanliga kläder eller kläder som kommer i direkt hudkontakt då rester av slipdamm kan spridas till övriga kläder.

13 Materialegenskaper

Ofta beskrivs hållfasthetsegenskaperna för enbart fibrerna istället för det slutgiltiga laminatet. Det beror på att det är enklare då fibrerna har bestämda draghållfasthetsegenskaper medan egenskaperna för en plast armerad med samma fibrer beror på många olika faktorer.

Men det beror även på att de faktiska hållfasthetsvärdena för fiberkompositer långt understiger de fibrer som armerar kompositen, något som tillverkarna av fibrer och förordarna av fiberkompositer ibland verkar "glömma bort".

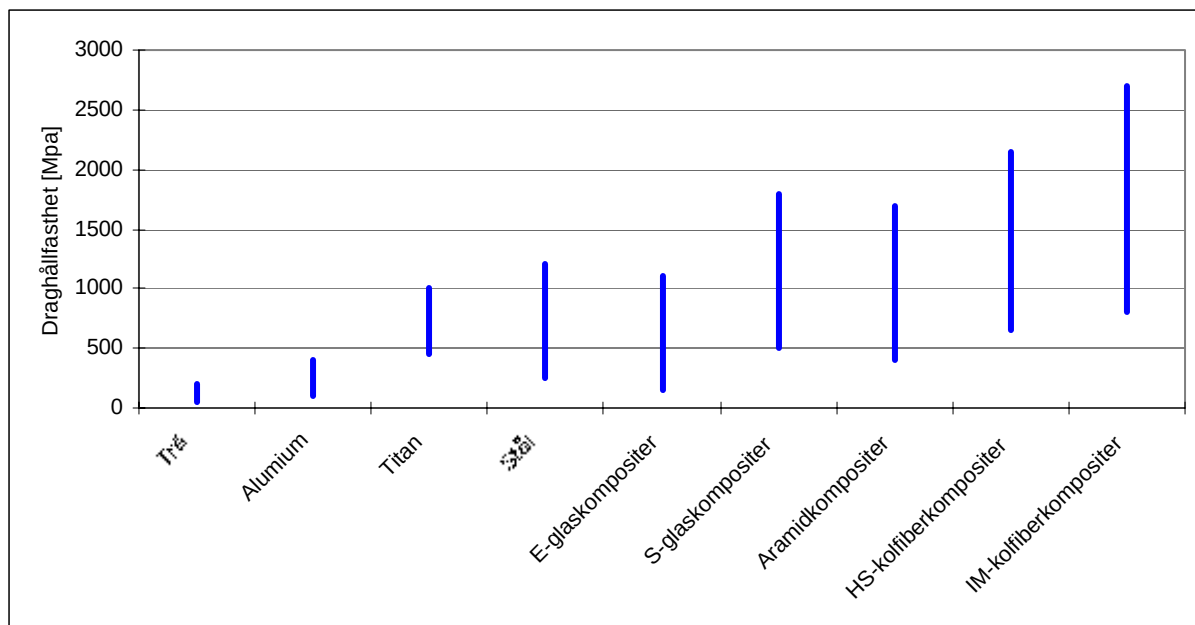
Fibrerna är nästan aldrig placerade enbart i den riktning som konstruktionen eller provbiten belastas utan även i andra riktningar.

Därtill kan en fiberkomposit med en fiberhalt på tex 50% aldrig ha en draghållfasthet och E-modul vid drag som är långt över 50% av draghållfastheten och E-modulen för de ingående fibrerna.

Hållfasthetsegenskaperna för färdiga laminat är dock betydligt intressantare än de ingående fibrernas hållfasthetsegenskaper då fiberkompositer jämförs med andra konstruktionsmaterial.

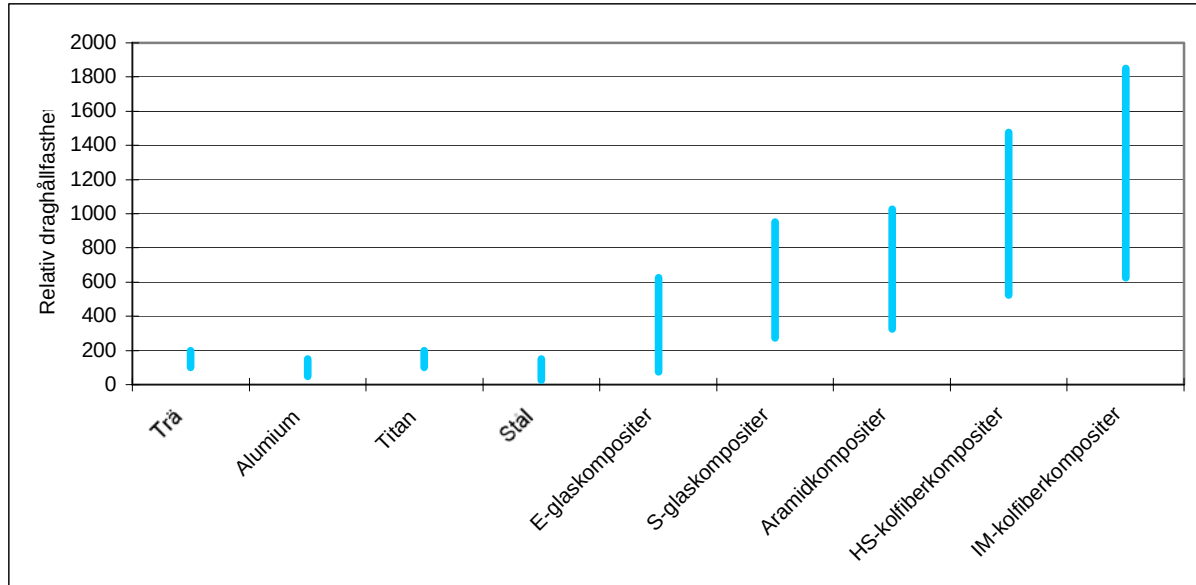
13.1 Draghållfasthet

Nedan plottas en jämförelse mellan draghållfastheten för olika konstruktionsmaterial där staplarna visar inom vilket område som draghållfastheten för materialet kan variera mellan. För fiberkompositer är skillnaderna ofta större än för andra konstruktionsmaterial då många faktorer styr materialets totala egenskaper: fiberriktningen, fiberhalten, längden på de ingående fibrerna men även den lamineringsmetod som fiberkompositen har tagits fram med.



Ofta är hållfasthetsegenskaperna i förhållande till materialets densitet intressantare än materialets faktiska egenskaper. Om ett material har lägre densitet kan dimensionerna ökas utan att vikten ökar vilket kan ge en starkare konstruktion.

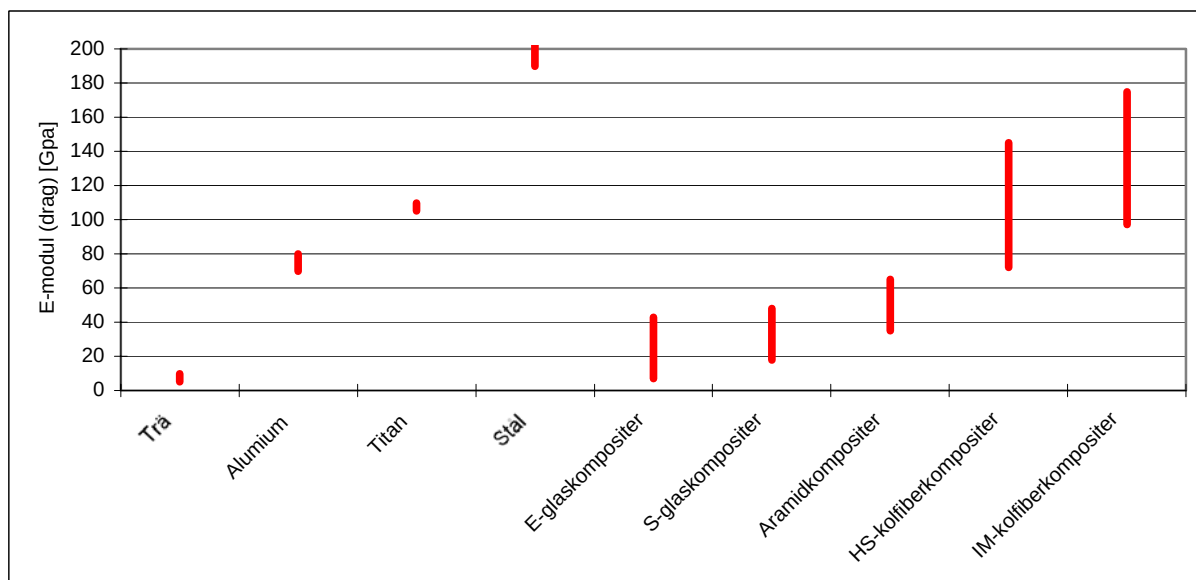
Nedan plottas därför den relativa draghållfastheten, dvs draghållfastheten dividerat med densiteten för materialet.



13.2 E-modul

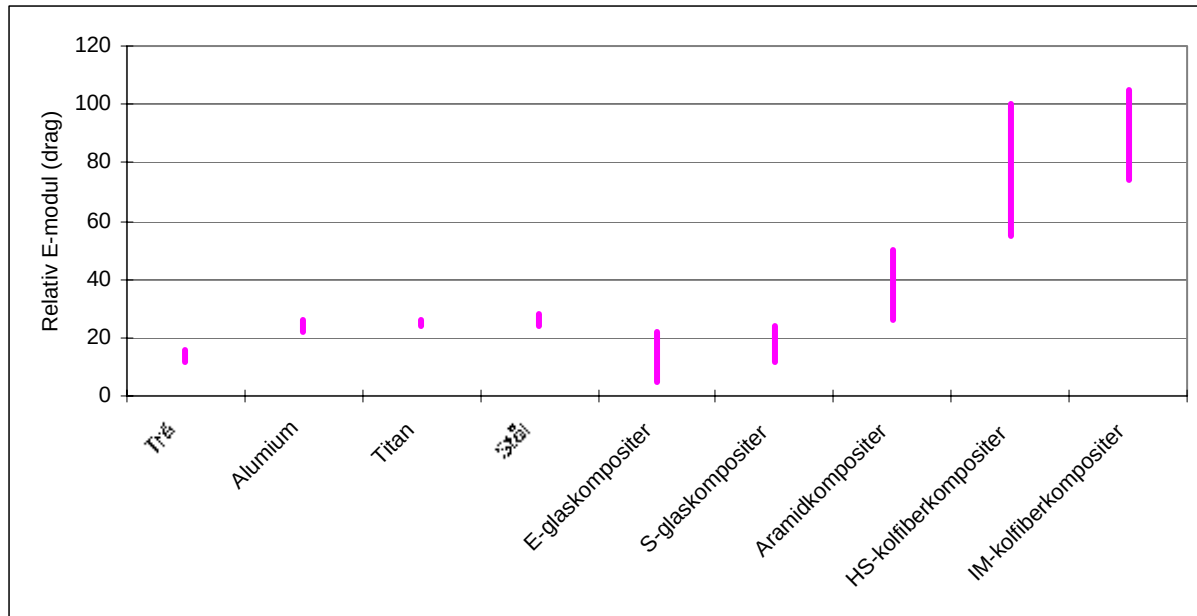
Elasticitetsmodulen för ett material är vid dimensionering ibland viktigare än draghållfastheten. Detta gäller speciellt för mindre styva fiberkomposit tex armerade med glasfiber som kan vara tillräckligt stark i en konstruktion men måste dimensioneras grovt för att åstadkomma högre styvhet.

Nedan plottas därför E-modulen för några konstruktionsmaterial. Samma som vid draghållfastheten så skiljer E-modulen mellan olika komposit med samma fiber beroende på kompositens uppbyggnad och lamineringsmetoden.



Även då det gäller E-modulen för olika material är ofta egenskaperna i förhållande till densiteten intressantare än materialets faktiska egenskaper.

Därför plottas nedan den relativa E-modulen för olika konstruktionsmaterial, dvs E-modulen dividerat med materialets densitet.



14 Jämförelse med konstruktionsmetaller

Även om fiberarmerad plast medger många fördelar vid konstruktion kan metall ibland vara att föredra för att nå de egenskaper som konstruktören eftersträvar men även för att minimera kostnaden och tidsåtgången.

Armerad plast klarar dåligt punktbelastning även om materialet i övrigt har goda hållfasthetsegenskaper. Därför lamineras ofta delar av metall in i fiberkompositkonstruktioner för att på det sättet utnyttja båda materialens fördelar.

Konstruktören bör därför även vid fiberkompositkonstruktion ha kunskaper kring de vanligaste konstruktionsmetallerna, deras egenskaper och hur de kan nyttjas i och tillsammans med armerad plast.

14.1 Stål

Stål är den i särklass vanligaste metallen för alla typer av konstruktioner. Priset är lågt samtidigt som stål är starkt och styvt. De flesta stålqualitéer är enkla att svetsa i och kräver ingen efterbehandling för att uppnå full styrka. Densiteten är dock hög och metallen är rostbenägen (gäller ej rostfria kvalitéer).

14.2 Aluminium

Aluminium är den efter stål vanligaste metallen. Som konstruktionsmaterial har aluminium många fördelar: låg densitet (1/3 av stål), hög styrka (finns legeringar som är lika starka som kolstål), rostar inte på samma sätt som stål och oxiden skyddar mot ytterligare oxid. Aluminium är dessutom lätt att bearbeta (mjukt).

Till nackdelarna hör att metallen är relativt svårsvetsad och ofta måste värmebehandlas för att uppnå full styrka. Konstruktioner av aluminium kan även spricka utan förvarning vid upprepade belastning.

Eftersom aluminium går att formspruta i de mest skilda profiler och dessa ofta väl kan utnyttjas i konstruktioner är aluminium i denna form mycket vanlig i konstruktionssammanhang.

Aluminium går att eloxera då metallen påtvingas ett extra tjockt skyddande oxidskikt varvid metallen tål krävande marin miljö.

14.3 Titan

Titan är en exklusiv konstruktionsmetall med många fördelar: låg densitet (ca ½ av stål), hög styrka (finns legeringar som är lika starka som konstruktionsstål), mycket högt korroderingsmotstånd, då det täta oxidskiktet som bildas stoppar ytterligare korrodering. Till nackdelarna hör främst det höga priset men också svårighet att svetsa och ohälsamma gaser vid bearbetning.

I medicinska sammanhang har titan en särställning. Metallen är vävnadsvänlig och har en egenskap som medger att benvävnad kan växa fast om metallen ytbehandlas rätt samtidigt som titanets oxidskikt, som är tätt, svårslösligt och neutralt stoppar ytterligare korrodering.

Utbytesdelar i kroppen som, knäleder, höftleder, käkben och liknande tillverkas därför ofta helt eller delvis av titan.

14.4 Magnesium

Magnesium är den lättaste metallen med en densitet som är hälften av aluminium.

I förhållande till vikten är metallen stark och styv.

Metallen är dock mycket korroderingsbenägen och oxiderar i obehandlat skick direkt i luft eller vatten. Ytbehandlingen av metallen är därför viktig speciellt för att undvika att förorenat vatten når metallen som annars snabbt bryts ner.

Metallen är även brandfarlig och i tunna dimensioner eller pulverform brinner metallen med intensivt hetta.

Magnesium utnyttjas oftast i ljuten form men kan även svetsas, vilket dock kräver hög skicklighet.

14.5 Hållfasthetsjämförelse

	E-modul (drag) [GPa]	Draghåll- fasthet [Mpa]	Påkänning vid 0,2% töjning [Mpa]	Brottöjning [%]	Utmattnings- gräns / drag- hållfasthet	Densitet [g/cm ³]	Längdut- vidgnings- koefficient [10 ⁻⁶ /°C]
Stål							14
Kolstål	200	520	310	26	0,5	7,85	
CrMo (AISI 4130)	200	1425	1240	12	0,5	7,85	
Aluminiumlegeringar							23
2024-T4 (SS 43 55)	73,1	470	325	20	0,29	2,8	
6061-T6 (SS 42 12)	68,9	310	276	12	0,31	2,8	
7075-T6 (SS 44 25)	71,7	570	503	11	0,265	2,8	
Titanlegeringar							10
IMI 125	105-120	390-540	340	20-29	0,5	4,51	
IMI 318	105-120	1000	900	8	0,55	4,42	
Magnesium	44	248	200	5-8	0,37	1,79	26

T = tillståndssiffran: T4 = kallådrat, T6 = varmådrat. CrMo = Kromomolybdenstål

14.6 Metaller tillsammans med armerad plast

Bitar av metall utnyttjas ofta tillsammans med fiberarmerad härdplast som direkt del av konstruktionen, skydd mot punktblastning, bultfästen och liknande. Biten lamineras då in i kompositkonstruktionen, limmas, skruvas eller nitas fast.

Olika metaller är olika lämpliga att laminera in i en fiberkomposit. Det beror främst på hur väl plasten kan binda mot metallens yta men även hur metallen reagerar vid eventuell kontakt med kolfiber som är elektriskt ledande och galvaniskt element kan uppstå om metallen är oädel. Då det föreligger risk för att fukt kryper in i laminatet till metallen är det även viktigt att metallen inte är korroderingsbenägen. Om metallbiten korroderar kan den släppa från laminatet.

Översikt – metallers lämplighet för inlaminering i fiberkomposit:

Metall	Fördelar	Nackdelar
Stål	+ Limmas väl	- Risk för rost
Rostfritt stål	+ Ingen risk för rost + Små risker för galvaniskt element vid kontakt med kolfiber + Behöver ej efterbehandlas eller målas	- Svårt att limma, dåligt fäste mot plasten
Alumium	+ Limmas väl + Lätt att riva upp grov yta för maximalt fäste	- Risk för galvaniskt element vid kontakt med kolfiber - Stor temperaturutvidgning (risk för spänningar)
Titan	+ Behöver ej efterbehandlas eller målas + Små risker för galvaniskt element vid kontakt med kolfiber + Kort längdutvidgning	
Magnesium	+ Lätt att riva upp grov yta för maximalt fäste	- Stor risk för galvaniskt element vid kontakt med kolfiber - Stor temperaturutvidgning (risk för spänningar)

15 Experiment - Lamineringsprov för bakkåpa

Några experiment utan anknytning till denna rapport har genomförts vid framtagande av laminat till en bakkåpa / packlåda till en liggcykel, som skall ersätta den som syns på sidan 68.

Resultaten kan dock vara till visst intresse vid framtagande av liknande konstruktioner som kräver kombination mellan låg vikt, hög styvhet och hög tryck- och slagåtlighet varför experimenten har tagits med i rapporten.

Bakgrundsbeskrivning:

Tester har genomförts för att få fram det bästa möjliga materialet till en hård bakkåpa på en liggcykel som bildar en låda för 80-90 liter packning. Skall klara transport på flyg och kunna användas som "solstol" vid tält (på marken). Sandwichkonstruktion med 10mm distansmaterial av högdensitetspolystyren utnyttjas för att få minimal vikt kombinerat med maximal styvhet och bra pris/prestanda.

Preliminär vikt för bakkåpan: 3-4kg inkl lås mm.

Flera testbitar (ca 15x12cm) har laminerats som sedan har jämförts med varandra.

Samma sandwichplatta vid alla försök: 10mm NM-platta (högdensitetspolystyren 55kg/m³).

Ett lager 160g/m² 2x2-twill glasfiberväv på baksidan.

Matris:

NM-275 - rumstemperaturhårdande lamineringsepoxi.

Potlife vid 22 grader: 45 minuter.

Plasthalt i alla laminat: 40-60% (oftast kring 50-55%).

Underbehandling mellan laminat och platta:

1 lager lamineringsepoxi (NM275) tixtroperad med kiselpulver, som har fått härda i rumstemperatur tills epoxin hårdnat men fortfarande är klibbig: 100-150g/m².

Alla vävar testades även att färgas med blå/cyan infärgningspasta (ca 1% av basen) för att avgöra om detta förbättrar utseendet. Färgad epoxi gör det enklare att laminera riktigt "snålt" då man lätt ser om väven är genomvätt.

Alla tester genomfördes i rumstemperatur.

15.1 Testmoment

[1] Intryckning:

Står med hälen av fot (endast iförd strumpor) på den laminerade plattan, trampar till rejält. Tar bort foten och ser hur djup grop som har åstadkommit.

Avgör visuellt (för att se hur mycket gropan syns) och med fingrarna för att avgöra hur djup gropan är.

(Simulerar att bakkåpan ligger på marken fullpackad (ca 20kg) samtidigt som jag (60kg) använder den som "solstol", och en sten ger punktbelastning på lådans undersida.)

[2] Slag:

Med hjälp av enkel testutrustning där en 8mm pinne i rostfritt stål har monterats på en större hammare. Spetsen på pinnen har slipats så att den är rund och motsvarar ungefär en plattare 8mm stålkula. Hammaren är ledad i bakändan mot ett fyrkantsrör som är monterat i ett skruvstöd på ett snickarbord. Hammaren tillåts "ramla" från lodrätt till nedslaget på plattan då hammaren är vågrätt.

Antal slag innan genomslag testas samt påverkan på laminatet vid ett slag.



Enkel slagtestutrustning på laminat med tigmatta (delvis infärgad)

[3] Utseende:

Subjektivt avgörs utseendet på de olika laminaten.

Laminat som testades:

- 1) 160g/m² glasfiberväv (2x2-twill)
- 2) 2x160g/m² glasfiberväv (2x2-twill)
- 3) 300g/m² glasfiberväv (2x2-twill)
- 4) 170g/m² teryleneväv (plain)
- 5) 2x170g/m² teryleneväv (plain)
- 6) 200g/m² kolfiber T300 (2x2-twill)
- 7) 210g/m² aramid / kolfiberväv "tigerväv" (50 viktprocent Kevlar 49, 50 viktprocent kolfiber T300, 2x2-twill)
- 8) 1x170g/m² terylene + 1x160g glasfiber



Slagtestutrustning och olika provlaminat för slagtest, tryck och utseende

15.2 Testresultat

[1] Intryckning:

(1-5, där 1 motsvarar stor intryckning och 5 motsvarar ingen intryckning)

- 1) 2
- 2) 4
- 3) 3
- 4) **1**
- 5) 2
- 6) **5**
- 7) 2
- 8) 3

Kommentar:

Förvånande att det blir så stor grop med tigerväven trots att den innehåller styv kolfiberväv. Visuellt syns intryckning mer på terylene- och kombiväven än glasfiber då glasfiberlaminatet är halvtransparent.

Kolfiberväven håller mot gropar nästan till 100%

Två tunna glasfibervävar står emot tryckgropar mer än en kraftigare.

[2] Slag:

Antal slag innan genomslag / resultat efter ett slag

- 1) 2 (nästan genom vid ett slag) / hål
- 2) 3 / liten buckla, några trasiga fibrer
- 3) **5** / bred grund buckla, endast några trasiga fibrer
- 4) 2 / många trasiga fibrer, begränsad storlek på håldiametern
- 5) **5** / några trasiga fibrer
- 6) **1** / hål rakt igenom
- 7) 2 (nästan helt igenom vid ett slag) / hål
- 8) 4 / liten buckla, några trasiga fibrer

Kommentar:

Förvånansvärt att tigerväven trots kevlarfibrerna som skall vara mycket slagtåligt så lätt slås igenom. Spetsen studsar på glasfibern och terylenelaminatet men slår stumt på tigerväven vilket kanske förklarar att mer energi överförs till tigerväven. Den enkla anslagsutrustningen kan därför inte antas ge helt tillförlitliga resultat.

Kolfibern är som väntat mycket slagkänslig pga att den inte töjer sig i någon omfattning innan brott.

Ett lager tjockare glasfiberväv håller bättre mot slag än två tunna.



Infärgade glasfiberlaminat, det övre efter slagprov

[3] Utseende:

(1-5, där 1 motsvarar oattraktivt utseende och 5 motsvarar snyggt utseende)

- 1) 1
- 2) 2
- 3) 3
- 4) 3
- 5) 3
- 6) 5
- 7) 4
- 8) 3

Kommentar:

Av naturliga skäl ser kolfiberväven snyggast ut med dess karakteristiska 3D-kolfiberstruktur.

Tigermattan har vissa tendenser åt det hållet, ser intressant ut med färgkombinationen.

Teryleneväv är optiskt halvtät medan glasfiberväven är optiskt halvtransparent. Infärgning av glasfiberväven ger utseende som liknar något "I-MAC-skalet" dock rejält fläckigt och NM-plattan syns igenom.

Vikt [gram/m²] för enbart laminatet:

dvs på en sida (plattan väger 550g/m² och suger ca 100-150g/m² och sida), räknar generellt med 50 viktprocent matris, 50 viktprocent väv (stämmer inte 100% då olika fibrer suger olika mycket)

- 1) **320**
- 2) 640
- 3) 600
- 4) 340
- 5) **680**
- 6) 400
- 7) 420
- 8) 660

Pris [kr] per kvadratmeter:

för vävarna, inom parentesen står priset för den mängd epoxi som behövs (vid 50% plasthalt) (avrundat till närmsta 5kr):

- 1) **30** (20)
- 2) 60 (40)
- 3) 40 (40)
- 4) 60 (20)
- 5) 120 (40)
- 6) 250 (25)
- 7) **375** (20)
- 8) 90 (40)

Komplettering:

Experimentserier har även genomförts med andra kärnmaterial:

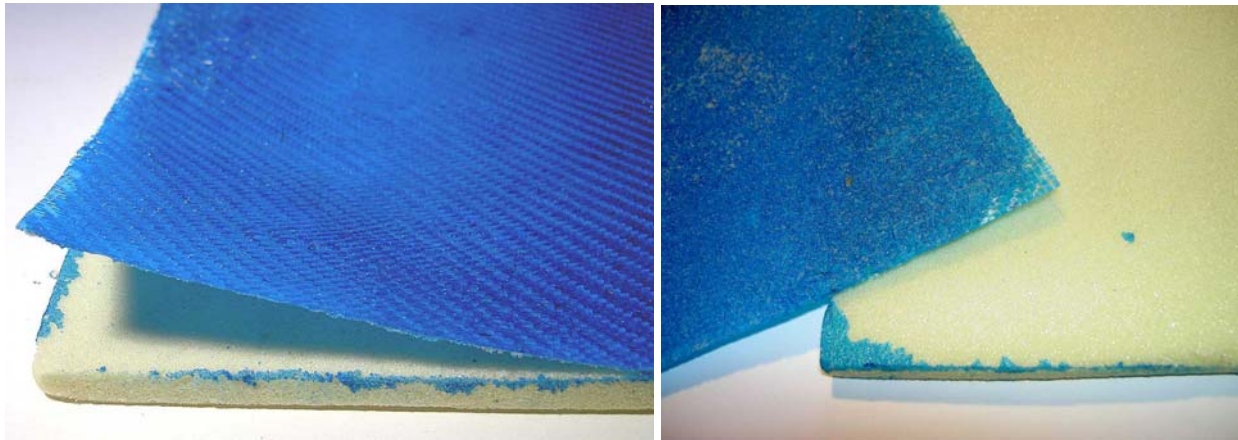
- Polyuretan – Bonocell S40 (40 kg/m³) 10mm
- Vinylcellplast – Divinycell H45 (45 kg/m³) 5mm

Resultaten har jämförts med motsvarande sandwichlaminat med polystyren (NM-plattan) som kärnmaterial. Följande observationer har gjorts:

Polyuretan – Bonocell

Sandwichlaminat med Bonocellplatta som kärnmaterial klarar bättre tryck och slag än motsvarande laminat med NM-platta (polystyren) som kärnmaterial. Detta pga polyuretanet dämpar slag betydligt bättre och återfjädrar vid tryck.

Däremot så delaminerar sandwichlaminat med Bonocell som kärnmaterial mycket lätt pga polyuretanskumplastens dåliga draghållfasthet. *Se bilderna (nästa sida).*



Delaminering av glasfiberlaminat på Bonocellplatta, 300gr/m² glasfiberväv laminerad med blåpigmenterad epoxi

Vinylcellplast – divinycell

Egenskaperna för sandwichlaminat med Divinycell som kärnmaterial liknar mycket sandwichlaminaten med NM-plattan som kärnmaterial. Resultaten vid slag- och tryckproverna skiljer sig inte i någon större omfattning.

Divinycellen är något styvare än NM-plattan medan NM-plattan är något segare och bättre klarar viss deformation utan att brista.

Experimenten har även kompletterats med laminering av **Dyneemaväv** (150gr/m²) på samma sätt som med övriga fibervävar men eftersom Dyneemafibrerna inte väts tillräckligt av lamineringsepoxy delaminerade sandwichlaminatet vid små belastningar varför ytterligare tester ansågs onödiga.

16 Källhänvisning

Litteratur:

Glasfiber Plast för hobby och hantverk

Författare: Hjalmar Larsson

Utgivningsår: 1983

Armerade Härdplaster – Helt enkelt!

Författare: Gunnar Westerlund

Utgivningsår: 2003

ISBN: 91-85107-01-8

NM Epoxihandbok

Författare: Curt Augustsson

Utgivningsår: 2000

Materiallära Karlebo

Författare: Erik Ullman m.fl.

Utgivningsår: 1997

ISBN: 91-47-00157-7

Karlebo Handbok

Utgivningsår: 2000

ISBN: 91-47-01558-6

Kemi för gymnasieskolan

Författare: Yngve Lindberg, Helen Pilström, Ebba Wahlström

Utgivningsår: 1995

ISBN: 91-27-61031-4

Facktidningar:

PLAST Forum Nordica

Nr 8 augusti 2001

Komposit-temanummer

Nr 13 november 2000

Materialskolan: Härdplastkompositer

Nr 10 september 2001

Materialskolan: Termoplasters mekaniska egenskaper

Internetlänkar:

Toray kolfiber:

http://www.rkgruppen.se/swedish/produkter/kolfiber_torayca.htm

Kolfiberjämförelser:

<http://znet.com/~sdsampe/fibertable.htm>

Kevlar – DuPont:

<http://www.dupont.com/kevlar/index.html>

Twaron (japansk aramidfiber):

<http://www.twaron.com>

Technora (japansk aramidfiber):

http://www.teijin-aramid.com/ENG/tech_frame.htm

Dyneema:

<http://www.toyobo.co.jp/e/seihin/dn/dyneema/index.htm>

Epotex (epoxi och lamineringsprodukter):

<http://www.epotex.se>

Nils Malmgren (epoxi och lamineringsprodukter):

<http://www.nilsmalmgren.se>

SP-system (epoxi och lamineringsprodukter):

<http://www.spsystems.com>

NetComposites (kompositbeskrivning, fibrer, hårdplast):

<http://www.netcomposites.com/education.asp?sequence=2>

Enkel beskrivning av lamineringsfibrer och vävar:

<http://www.favonius.com/soaring/materials/material.htm>

Design InSite (fiberbeskrivning, tillverkningsprocesser):

<http://www.designinsite.dk/>

Divinycell (PVC-cellplast):

<http://www.divinycell.se/>

Plastinformationsrådet:

<http://www.plastinformation.com>

Plast och Kemibranscherna:

<http://www.plast-kemi.se>

17 Inköpskällor för kompositmaterial

Väv, plast, sandwichmaterial mm för fiberkompositlaminering, för privatpersoner och mindre företag

Epotex

Specialbutik för epoxiprodukter, försäljningsbolag åt Nils Malmgren
Stort utbud, bra priser och hög kompetens

 <http://www.epotex.se/>

 Svarvarvägen 10 Skogås

 08-609 00 50

Nils Malmgren

Tillverkare av epoxiprodukter.

Stort utbud, bra priser och hög kompetens

 <http://www.nilsmalmgren.se/>

 Valnäsgratan 6, Ytterby

 030-393610, fax: 030-392855

För ytterligare återförsäljare (totalt 20st) se hemsidan:

<http://www.nilsmalmgren.se/bsaeljare.html>

Svenska Tanso

Sveriges största importör av kolfiber och högprestandafibrer

Bra priser och hög kompetens

 <http://www.tanso.se/>

 Källebacksvägen 9, Jönköping

 036-368 500, fax: 036-368585

Divinycell

Tillverkare av ett av det mest kända och enligt många bästa distansmaterialen för sandwichkonstruktioner

 <http://www.divinycell.se/>

 Laholm

 0430-16300, fax: 0430-16395

Swecomposite

Svensk återförsäljare av högprestandaväv och distansmaterial

 <http://www.swecomposite.com/>

 Ekhammarsvägen 9, Åkersberga

Armtech – West System

Information och försäljning av WestSystems epoxiprodukter

 <http://www.nmi.se/West-System/>

 Älvsbyvägen 9B, Värmdö

 08-716 91 99, mobil: 070-5816617, fax: 08-7169159

Utländska:

Carbcom

Amerikansk försäljare av kolfiber- och högprestandafibrer

 <http://www.carbcom.net>

Swiss Composites

Schweizisk försäljare av kolfiber- och högprestandafibrer

 <http://www.swiss-composite.ch/>

Eurocarbon

Holländsk försäljare av kolfiber- och högprestandafibrer

 <http://www.eurocarbon.com/>

Båttillbehörsaffärer:

Har basutbud av lamineringsprodukter som polyester, gelcoat, topcoat, lamineringsepxi, glasfibermattor, glasfibervävar, förstärkningskolfiberband och ofta visst sandwichmaterial, fibervävar med högprestandafibrer och vinylester samt även släppmedel och liknande tillbehör. Generellt bra priser på basutbudet (polyester och glasfiber) men högre priser på resten.

Watski

53 butiker i Sverige, varav 8st i Stockholm, för information se hemsidan:

 <http://www.watski.com>

SeaSea

 <http://www.seasea.nu>

 Stockholm: Lövbacksvägen 4, Segeltorp

 Stockholm: 08-505 64 040, fax: 505 64 001

 Täby: Hamnvägen 8, Vigbyholm

 Täby: 08-544 44 180, fax: 08-544 44 181

 Göteborg: Björlanda Kile Småbåtshamn, Torslanda

 Göteborg: 031-92 77 70, fax: 031-92 77 71

Erlandsons Brygga

 <http://www.bryggan.nu>

 Karlsrogatan 1, Solna

 08-444 97 50, fax: 08-85 60 09

Båtaccenten

 <http://www.bataccenten.se>

 Hantverkarvägen 25A, Haninge

 08-777 52 00, fax: 08-777 52 10

Varuhus:

Biltema

Mycket bra priser på visst basutbud (polyester, glasfibermattor, polyesterspackel, lim) men i övrigt dåligt utbud på lamineringsprodukter

12 varuhus i Sverige se hemsidan:

 <http://www.biltema.se>

18 Datablad

Sammanställning över hållfasthetsegenskaperna för olika kolfiberkvaliteter

Källor:

<http://znet.com/~sdsampe/fibertable.htm>

http://www.rkgruppen.se/swedish/produkter/kolfiber_torayca.htm

<http://www.spsystems.com/pdfs/reinforcements/Rein%20Fibres%20&%20Finishes.pdf>

Kvalitéklassning Fiberbetäckning	E-modul (drag) [GPa]	Draghållfasthet [MPa]	Sträckgräns [%]	Rovingstorlekar Antal fibrer K=1000	Tillverkare
HS – High Strength (Standard då Draghållfasthet <4000MPa) E-modul: <265GPa					
AS4	221	3930	1,7	3K, 6K, 12K	HEXCEL
F3(C) 50K	228	3790	1,7	48K	FORTAFIL
PANEX 33	228	3620	1,6	3K, 6K, 12K	ZOLTEK
AS4C	228	3860	1,7	1K, 3K, 6K, 12K	HEXCEL
T600S	230	4120	1,8	24K, 28K	TORAY
T300J	230	4210	1,8	3K, 12K, 24K	TORAY
T700S	230	4900	2,1	12K, 24K	TORAY
G30-400	234	3790	1,6	1K	TOHO
G30-500	234	3790	1,6	1K	TOHO
34-700WD	234	4480	1,9	12K	GRAFIL
34-700	234	4480	1,9	12K, 24K, 48K	GRAFIL
AS4D	241	4210	1,7	12K	HEXCEL
G30-700	241	4830	2,0	12K	HEXCEL
T400H	250	4410	1,8	3K, 6K	TORAY
T650-35	255	4280	1,7	3K, 6K, 12K	AMOCO
IM – Intermediate Modulus E-modul: 265 – 320 GPa					
IM6	276	5240	1,7	12K	HEXCEL
IM4	276	4140	1,5	12K	HEXCEL
IM2A	276	4826	1,6	12K	HEXCEL
IM7	276	5380	1,8	6K, 12K	HEXCEL
42-650/MR40	290	4410	1,5	12K	MITSUBISHI/GRAFIL
T650-42	290	4830	1,7	12K	AMOCO
T40	290	5650	1,8	12K	AMOCO
G40-800	290	5860	2,0	12K, 24K	TOHO
IM9	290	6340	2,0	12K	HEXCEL
G40-600	293	4482	1,5	12K	TOHO
M30	294	3920	1,3	1K, 3K, 6K, 12K	TORAY
M30G	294	5100	1,7	18K	TORAY
M30S	294	5490	1,9	18K	TORAY
T800H	294	5490	1,9	6K, 12K	TORAY
T1000G	294	6370	2,2	12K	TORAY
IM8	303	5450	1,7	12K	HEXCEL
HM – High Modulus E-modul: 320 – 440 GPa					
M46J	436	4210	1,0	6K, 12K	TORAY
M35J	343	4700	1,4	6K, 12K	TORAY
G50-500	351	3450	1,0	12K	TOHO
G50-300	359	2970	0,8	12K	TOHO
M40J	377	4410	1,2	6K, 12K	TORAY
56-700/HR40	381	4830	1,2	12K	MITSUBISHI/GRAFIL
M40	392	2740	0,7	1K, 3K 6K, 12K	TORAY
T50	393	2900	0,7	3K, 6K, 12K	AMOCO
G55-700	393	5170	1,3	12K, 24K	TOHO
M46J	436	4210	1,0	12K	TORAY
UHM – Ultra High Modulus E-modul: >440 GPa					
UHM	441	3450	0,8	3K, 6K, 12K	HEXCEL
64-650/HS40	441	4410	1,0	12K	MITSUBISHI/GRAFIL
M50J	475	4120	0,8	6K	TORAY
M55J	540	4020	0,8	6K	TORAY
M60J	588	4820	0,7	3K, 6K	TORAY

Kolfiber: TORAYCA

Typiska fiberegenskaper

Källa: http://www.rkgruppen.se/swedish/produkter/kolfiber_torayca.htm

Fibre Type	Number of filaments	Tensile Strength (MPa)	Tensile Modulus (GPa)	Elongation (%)	Mass per Unit Length (g/1000m)	Density (g/cm ³)	Electric Resistivity (10 ⁻³ ohm.cm)
FT300/T300	1000 3000 6000 12000	3530	230	1,5	66 198 396 800	1,76	1,8
T300J	3000 6000 12000	4210	230	1,8	198 396 800	1,78	1,6
T400H	3000 6000	4410	250	1,8	198 396	1,80	1,6
T600S	24000 48000	4120	230	1,8	1700 3400	1,80	1,7
T700S	12000 24000	4900	230	2,1	800 1650	1,80	1,7
T800H	6000 12000	5490	294	1,9	223 445	1,81	1,4
T1000G	12000	6370	294	2,2	485	1,80	1,5
M35J	6000 12000	4700	343	1,4	225 450	1,75	1,1
M40J	6000 12000	4410	377	1,2	225 450	1,77	1,0
M46J	6000 12000	4210	436	1,0	223 445	1,84	0,9
M50J	6000	4120	475	0,8	216	1,88	0,8
M55J	6000	4020	540	0,8	218	1,91	0,8
M60J	3000 6000	3820	588	0,7	100 200	1,94	0,7
M30S	18000	5490	294	1,9	745	1,73	-
M40	1000 3000 6000 12000	2740	392	0,7	61 182 364 728	1,81	0,8

Lamineringsepoxi: NM Laminering 275 A

Källa: http://www.epotex.se/html/datablad_laminering_0.html

Användningsområde:

Produktion av epoxilaminat, reparation av skador i laminat, limning av trä m.m.

Tekniska data:

Typbeteckning bas:	NM Laminering 275 A
Härdare:	NM Härdare 275 B
Blandningsförhållande harts - härdare:	100 - 55 vikttdelar 100 - 63,25 volymdelar
Densitet:	1098 kg/m ³
Viskositet:	800 mPa s
Potlife 100g 20° C:	40 min.
Potlife 100g + 10% Acc. 254:	15 min. (se även tabell nedan)
Tryckhållfasthet ISO R604:	ca 90 MPa
Draghållfasthet ISO 527:	56 MPa
E-modul (drag) ISO 527:	2,35 GPa
Brottöjning ISO 527:	3,5%
Böjhållfasthet ISO 178:	95 MPa
E-modul (böj) ISO 178:	3 GPa
HDT ISO 75 Af:	60° C
Vattenabsorption ISO 6224h:	0,15%
Kulör:	Transparent
Satsstorlek:	0,5 + 0,275 = 0,775 kg 0,9 + 0,5 = 1,4 kg 5 + 2,75 = 7,75 kg

Verktyg rengörs i aceton.

Potlife för NM Laminering 275 A / NM Härdare 275 B med olika halt NM Accelerator 254.

Mätvärden gäller 100 gram Laminering 275 A / NM Härdare 275 B med begynnelsestemperatur 20° C med en tillsats av en procentuell acceleratormängd. T.ex. 100 gram + 1 gram. Se tabellen nedan.

% Accelerator 254	Potlife (minuter)
0	40
1	33
2	28
3	25
4	22
5	20
6	19
7	18
8	17
9	16
10	15

19 Varumärken, handelsnamn

I rapporten förekommer ord och namn på fibrer och kärnmaterial som är av företag registrerade varumärken (®) eller handelsnamn (™). Av praktiska skäl har endast den eller de första förekomsterna av namnen i rapporten markerats.

Nedan följer en lista över namnen i bokstavsordning:

Bonocell – *polyuretancellplast*

Dacron – *polyesterfiber*

Divinycell – *vinylcellplast*

Dyneema – *fiber*

Frigolit – *polystyrencellplast*

Herex – *vinylcellplast*

Inotan – *polyuretancellplast*

Kevlar – *aramidfiber*

NM-plattan – *polystyrencellplast*

Nomex – *honeycomb*

Rohacell – *akrylcellplast*

Spectra – *fiber*

Technora – *aramidfiber*

Teijinconex – *aramidfiber*

Terylene – *polyesterfiber*

Twaron – *aramidfiber*

20 Ordlista

Ovanliga ord och förkortningar som återfinns i rapporten eller relaterade, sorterade i bokstavsordning. Förklaringar beskriver ordets aktuella betydelse (vissa ord kan ha en annan betydelse i andra sammanhang).

Accelerator – substans som tillförs i härdplastharts för att förkorta härdtiden

AP – Armerad plast (ibland synonymt med Armerad Polyester)

Aramid – fiber för fiberkompositer, linor och skottsäkra applikationer, hög slaghållfasthet

Armering – förstärkning

Bistenolpolyester – polyesterkvalité med god kemikalieresistens, främst mot alkali

Bobin – spole med upplindad roving, avlindas utifrån eller inifrån

Bonocell – polyuretancellplast för sandwichkonstruktioner, distansmaterial

Böldpest – skador efter att vatten har absorberats i glasfiberarmerad polyester, varvid laminatet får ”bölder”

Carbon – från eng. carbon fibre = kolfiber

C-glas – glasfiberkvalité med god kemisk resistens

CM – Continuous Mat, fibermatta med kontinuerliga fibrer i slingor

CrMo – Kromomolybdelstål, stållegering med god hållfasthet, vanlig i konstruktionssammanhang

CSM – Chopped Strand Mat, korthuggen fibermatta (4-5cm fibrer), vanligtvis E-glas, pulver- eller emulsionsbunden

Cutter – Anordning för klippning av roving, används vid laminatsprutning

Daggpunkt – den temperatur då fuktigheten i luft bildar dagg på ytor

Delaminering – fiberlaminat delas längs med laminatet eller kärnmaterialet vid sandwichkonstruktioner, uppkommer vid fläkande belastning eller dålig bindning mellan fibrerna

Divinycell – vinylcellplast för sandwichkonstruktioner, distansmaterial

E-glas – den vanligaste glasfiberkvalitén

Emulsionsbunden – bindning av kortfibrig glasfibermatta som löses upp av styrenet i polyester vid laminering

EP – Epoxiplast (se epoxi)

Epoxi – härdplast som bla utnyttjas som lim, skydd, till fiberkompositlaminering, goda mekaniska prestanda

Esterplast – se polyester

Exoterm – kemisk process som utvecklar värme

Flock – lösa fibrer för kompositlaminering

FRP – Fiberarmerad plast (Fiber Reinforced Plastics)

Gelcoat – härdplast specialanpassad som yttersta lager i laminat för bra utseende och skydd, pigmenterad, tixotrop

Grafitfiber – se kolfiber

GRP – Glasfiberarmerad plast (Glass fibre Reinforced Plastics)

GS – Sandwichmaterial med genomsågat mönster (Gredscore) och glasfiberväv, för böjda applikationer

HDT – Heat Deflection Temperature, anger den temperatur där plastens fysikaliska egenskaper försämras

Hetsyra-polyester – polyesterkvalité med god kemikalieresistens, främst mot syror och organiska lösningsmedel

HM – High Modulus, kolfiber- eller aramidkvalité med hög E-modul

Honeycomb – distansmaterial för sandwichkonstruktioner med bikupekakform

HS – High Strength, kolfiberkvalité av standardkvalité men något högre draghållfasthet

Hydrolys – sönderdelning genom vatten, ett vattenmolekyl tas upp samtidigt som en molekyl sönderdelas, förekommer för estermolikyl

Härdplast – tvärbunden plast, härdas genom kemisk process, ej möjligt att smälta och forma om

ILSS – interlaminar shear strength, spjälkhållfasthet för ett laminat eller bindningsstyrkan av fibrerna i ett laminat

IM – Intermediate Modulus, kolfiber- och aramidkvalité med hög E-modul och hög draghållfasthet

Isoftalsyrapolyester – polyesterkvalité med kemikalieresistens

ISO-PNG-polyester – polyesterkvalité med god åldrings-, väder och vattenbeständighet

ISO-polyester – se Isoftalsyrapolyester

Katalysator – substans som tillförs härdplastharts för att påbörja ett härdningsförlopp

Kevlar – aramidfiber (se Aramid)

Koboltnaftanat – vanlig acceleratorssubstans till omättad polyester

Kolfiber – armeringsfiber med hög hållfasthet

Komposit – två eller flera material för att ta fördel av de olika materialens karakteristik

Kärnmaterial – sandwichmaterial som separerar de lastbärande yttre skikten i en sandwichkonstruktion

Laminat – kompositmaterial uppbyggt av flera lager

Laminera – bygga upp fiberkomposit genom att väta armeringsfibrer med en matris

Lamineringsepoxi – epoxiplast specialanpassad för fiberkompositlaminering, låg viskositet

LSE – lågstyrenavdunstande polyester, ”miljöpolyester” med lågt styreninnehåll och/eller inblandat vax

Matris – bindemedel i fiberkomposit

MEK-Peroxid –katalysator / härdare till omättad polyester

ORTO-polyester – polyesterkvalité med god åldersbeständighet, ”allroundpolyester” för AP-komposit

PNG-polyester – polyesterkvalité

Polyester – plast, både termoplast (mättad polyester) och härdplast (omättad polyester), den mest använda härdplasten vid fiberkompositlaminering

Potlife – den tid som en epoxiharts kan användas vid laminering från tillblanding till viskositeten är för hög

Pre-preg – väv förimpregnerad med harts

Pulverbunden – bindning av kortfibrig glasfibernatta som löses upp av styrenet i polyester vid laminering

Quartsglas – glasfiberkvalité med goda mekaniska egenskaper och hög temperaturtålighet

R-glas – se S-glas

Roving – fiberbunt för armering

Sandwichkonstruktion – två tunna men starka täckskikt separerade med ett lätt kärnmaterial

S-glas – glasfiberkvalité med hög hållfasthet

Sizing – ytbehandling av fiberväv, olika beroende på typ av matris

Termoplast – plast som är omformbar vid värme

Tigerväv – kombinationsväv med kolfiber och aramid

Tixotrop – trögflytande konsistens hos vätska för undvika att vätskan rinner utan att i större omfattning påverka den vätande förmågan

Topcoat – hårdplast anpassad som skydd för laminat, vanligtvis modifierad gelcoat

Toray – stor japansk kolfibertillverkare

Twaron – aramidfiber, japansk aramidfibertillverkare (*se Aramid*)

UDR – Unidirectional Roving, enkelriktad väv

UHM – Ultra High Modulus, kolfiber- och aramidkvalité med mycket hög E-modul

UV-strålning – Ultraviolet strålning, ljus med högt energiinnehåll, bla solljus, bryter ner de flesta plaster vid långvarig exponering

Vacuum bagging – Laminerings teknik där det härdande laminatet täcks med plastfilm varefter luften sugas ut, medför högre och jämnare kvalité, mindre luftbubblor, högre fiberhalt, bättre arbetsmiljö

Vinylester – hårdplast för bla fiberkompositlaminering, bra kemikalieresistens, bättre mekanisk prestanda än polyester

Viskositet – mått på hur lättflytande en vätska är, påverkar den vätande förmågan

WR – Woven Roving, rovingväv, grov väv

Värmehärdning – temperaturen höjs kring ett härdande laminat under vanligtvis den senare delen av härdprocessen, ger generellt ett bättre genomhärdat, starkare laminat