

De ongekekende

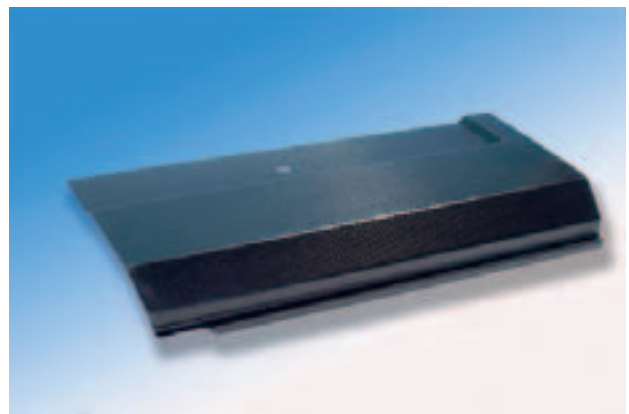
In de precisietechniek speelt massa-traagheid een belangrijke rol. Bij veel aandrijfsystemen wordt gestreefd naar een hoge verplaatsingssnelheid en een grote nauwkeurigheid van de positionering van componenten. Mechanische onderdelen dienen dus licht en stijf te worden uitgevoerd. Daarnaast spelen flexibiliteit in vormgeving en een laag energiegebruik een steeds belangrijkere rol. Reden om te kiezen voor een nieuwe generatie constructiemateriaal met ongekekende mogelijkheden, carboncomposiet.

• René Voogt •

Traditionele constructiematerialen zoals aluminium en staal beschouwt men over het algemeen als isotrope materialen. Dit houdt in dat een constructeur er gemakkelijk aan kan rekenen. De sterkte en stijfheid zijn bepaald en in alle richtingen gelijk. Toch is hier voorzichtigheid geboden, want gewalste metalen bijvoorbeeld hebben een andere sterkte in de walsrichting dan loodrecht erop. Net als bij de meeste natuurlijke materialen, zoals hout, spreken we hier over een anisotroop materiaal. Dit houdt in dat de eigenschappen in de X-, Y- en Z-richting van elkaar verschillen. Levende stoffen als hout hebben langs de nerven dan wel dwars erop verschillende sterktes. Kristallen hebben andere elektrische, magnetische, mechanische en optische eigenschappen al naar gelang de kristalassen. Vloeistoffen en gassen zijn isotroop. Amorfe of polykristallijne vaste stoffen zijn soms bij benadering isotroop.

Carboncomposiet

Carbonvezelcomposiet is een anisotroop materiaal: in de vezelrichting heeft het ongekekende sterkte-eigenschappen, loodrecht erop wordt de sterkte voornamelijk bepaald door het hars waarmee de vezels worden omsloten; zie Afbeelding 1 voor een voorbeeld van een toepassing. Als



Afbeelding 1. Voorbeeld van een composietproduct, een afdekplaat voor een robotarm (door Refitech).

hars kan gebruik worden gemaakt van hoogwaardige epoxy, fenol of bismaleimides, al naar gelang het toepassingsgebied; zie Tabel 1. Het feit dat het een composiet is, wil zeggen dat het uiteindelijke materiaal bestaat uit een samenvoeging van meerdere materialen, waarbij deze hun individuele eigenschappen behouden en het geheel verbeterde eigenschappen oplevert.

mogelijkheden van carboncomposiet

Tabel 1. Karakteristieken van verschillende typen hars.

Type hars	Maximum gebruikstemperatuur (°C)	Karakteristieken
fenol	100	Weerstand tegen brand en lage rookontwikkeling en toxische uitstoot
epoxy	80-180	Hoge chemische bestendigheid en eenvoudige productie
bismaleimides (BMI) en polyimides	260	Bestand tegen hoge temperaturen en uitstekende weerstand tegen chemische stoffen, brand en straling

Eigenlijk zijn we dus best gewend aan het werken met anisotrope materialen. Een verschil echter tussen een carbonvezelcomposiet en bijvoorbeeld een stuk gewalst staal is, dat de definitieve eigenschappen van het materiaal pas worden gevormd nadat het productieproces van de betreffende component is afgerond. Dit maakt het wat lastiger voor de constructeur en er zal wat rekenwerk vooraf moeten gaan aan het vastleggen van het definitieve ontwerp. Gelukkig zijn er tegenwoordig veel hulpmiddelen ter beschikking om een goede doorrekening van een ontwerp te maken. Refitech heeft experts die werken met onder meer ANSYS®-software. Hiermee is het krachtenspel in een component goed te bepalen, op basis waarvan de opbouw uit composiet kan worden bepaald.

Voordelen

Eén van de belangrijkste voordelen van een carboncomposiet-component is de combinatie van hoge specifieke sterkte en stijfheid met een laag gewicht; zie Tabel 2 voor een vergelijking van de soortelijke massa van diverse constructiematerialen. Met name voor hoogwaardige precisieonderdelen kan hierdoor:

- lichter worden geconstrueerd,
- een hogere snelheid met de betreffende component worden behaald,
- een lichtere aandrijving worden toegepast.

Tabel 2. Soortelijke massa van verschillende constructiematerialen.

Materiaal	Soortelijke massa ρ (kg/m ³)
glas-epoxy	2.550
carbon-epoxy	1.500
RVS	7.900
staal	7.800
aluminium	2.700

Daarnaast speelt in constructies vaak de vermoeingsfactor een belangrijke rol. Carboncomposiet heeft een zeer hoge bestendigheid tegen vermoeiing. Carbonproducten zijn in staat een vele malen hogere weerstand te bieden tegen cyclische belastingen dan metalen. Daarnaast is de breuksterkte bij vermoeiing van carbon-epoxycomposieten meer dan 60% van de maximale statische belasting. Dit is een veelvoud van wat met metalen haalbaar is.

Hinderlijke trillingen in machines en eigenfrequentieproblemen van onderdelen kunnen goed worden onderhouden door lichter te construeren. De eigenfrequentie van een component wordt bepaald door de stijfheid gedeeld door de massa (E/m). Het biedt dus grote voordelen met een composiet te werken dat een hoge E-modulus en een lage massa heeft, zodat een hoge eigenfrequentie wordt verkregen.

Daarnaast hebben glas- en carbonvezelcomposieten een zeer hoge chemische bestendigheid tegen zuren en chemicaliën en roesten de materiaaldelen niet. Ook hebben ze een zeer geringe uitzettingscoëfficiënt en zijn ze goed geluids- en warmte-isolerend ten opzichte van metalen; zie Tabel 3 voor een vergelijking. De mogelijkheid tot een zeer vrije vormgeving van de component, het direct meevormen van inserts (zoals bevestigingsclips en meetsensoren in prototypes) en de uitstekende reproduceerbaarheid van de vorm kunnen ontwerpers van machinedelen een grote meerwaarde bieden.

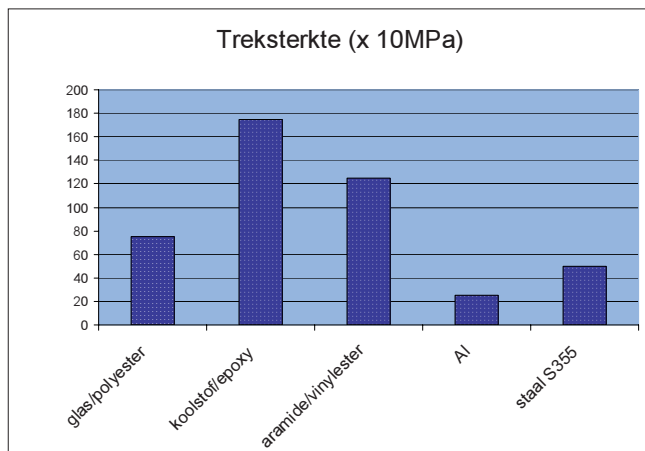
Tabel 3. Warmtegeleidingscoëfficiënt van verschillende (constructie)materialen.

Materiaal	Warmtegeleidingscoëfficiënt λ (W/mK)
glas-epoxy	~ 0,5
carbon-epoxy	~ 0,6-1,0 (afhankelijk van type)
RVS	~ 16-27
staal	~ 50
aluminium	~ 230
PU-schuim	~ 0,035 (afhankelijk van dichtheid)

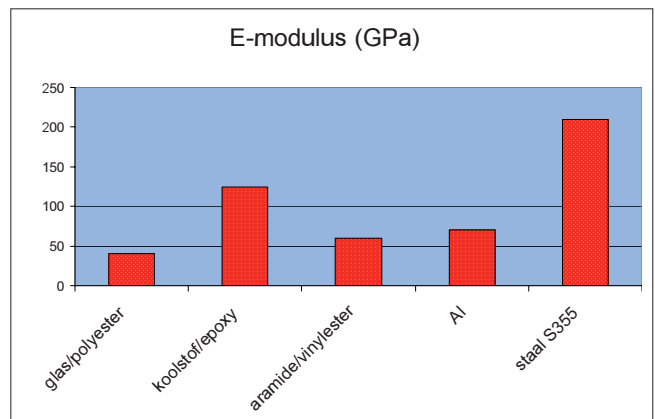
Treksterkte en stijfheid

De treksterkte is een maatstaf om de mechanische eigenschappen van een materiaal te classificeren en praktisch gezien is de vloeigrens van belang, aangezien het materiaal dan reeds plastisch is vervormd. Bij het construeren gaat het er dus met name om de proportionaliteitsgrens in de gaten te houden. Een tweede factor is de stijfheid van een materiaal. Deze geeft aan in welke mate een materiaal buiging kan vertonen, weergegeven met de elasticiteitsmodulus E , een materiaalconstante. Hoe hoger de E , des te stijver het materiaal. Een stijf materiaal is beter bestand tegen elastische vervorming wanneer het mechanisch wordt belast.

In onderstaande Grafieken 1 en 2 zijn respectievelijk de treksterkte en de E-modulus van een aantal composieten ten opzichte van aluminium en RVS weergegeven, uitgedrukt per dikte-eenheid. Bij de composieten vindt de belasting in de vezelrichting plaats.



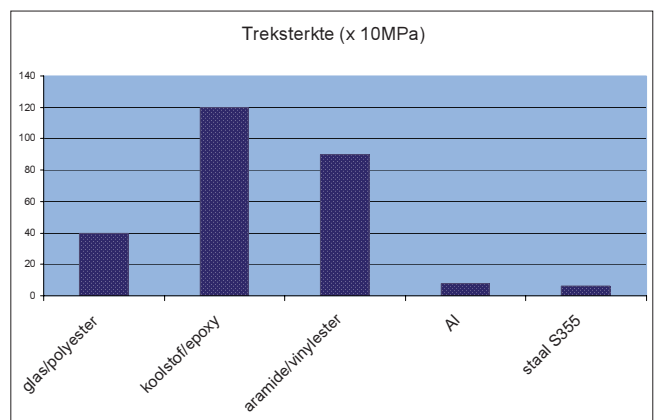
Grafiek 1. Treksterkte per dikte-eenheid van verschillende constructiematerialen. (Bron: [1])



Grafiek 2. E-modulus per dikte-eenheid van verschillende constructiematerialen. (Bron: [1])

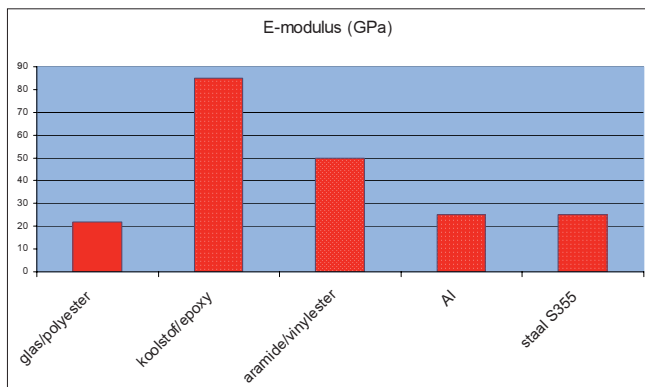
Opmerkelijk zijn de hoge treksterkte van het carboncomposiet ten opzichte van de overige materialen en de hoge elasticiteitsmodulus van RVS.

De plaatjes veranderen echter, indien de grafieken worden weergegeven per kg materiaal. De verhoudingen komen dan geheel anders te liggen; zie de Grafieken 3 en 4.



Grafiek 3. Treksterkte per kg materiaal van verschillende constructiematerialen. (Bron: [1])

Nu blijkt het carboncomposiet op beide fronten zeer goed te scoren. Met name de hoge elasticiteitsmodulus is bij het construeren van machine-onderdelen interessant. De meeste constructies zijn stijfheidkritisch en slechts op lokale punten sterktekritisch. Met carbonvezel kunnen dan lokale voorzieningen worden getroffen om dit op te lossen.



Grafiek 4. E-modulus per kg materiaal van verschillende constructiematerialen. (Bron: [1])

De hoge stijfheid van een carboncomposiet geeft aan dat de constructie in staat is om krachten af te dragen zonder te vervormen of door te buigen. Bij hoogwaardige sportartikelen, zoals carbon-fietsframes, wordt hier dankbaar gebruik van gemaakt. Door de hoge elasticiteitsmodulus gaat de kracht die tijdens het fietsen op het frame wordt uitgeoefend direct naar het draaien van het achterwiel en niet naar het bewegen van het fietsframe. Ook voor bijvoorbeeld hockeysticks geldt: hoe stijver, hoe meer kracht-overbrenging (op de bal); zie Afbeelding 2.



Afbeelding 2. Carbon- en aramidevezelversterkte hockeysticks.

Laminaatopbouw

Refitech werkt voornamelijk met de zogeheten prepreg-verwerkingsmethode van carbonvezels. Bij een prepreg liggen carbonvezels ingebed in een dun laagje niet-uitgehard epoxyhars. Ze zijn als het ware 'voorgeïmpregneerd' (vandaar de naam: *pre-impregnated*). Het geheel vormt een

'doek' van 0,2-0,8 mm dik waaruit vormen kunnen worden gesneden die – al dan niet gestapeld om de juiste dikte te krijgen – in een matrix op 120 °C worden uitgehard. De carbonvezels kunnen op verschillende manieren worden gebundeld (roving), waarna de bundels op verschillende manieren worden verwerkt. Bij unidirectioneel materiaal liggen de rovings in de lengterichting naast elkaar. Bij een weefsel worden de rovings op verschillende manieren geweven (gewoon, twill of satijnweefsel). Multi-axiale weefsels bestaan uit een stapeling van verschillende weefsels op elkaar tot een totaalpakket.

Het zal niet verbazen dat elke specifieke bundeling en weeftechniek specifieke eigenschappen aan het uiteindelijke product geeft. De grote voordelen van de prepreg-techniek boven het injecteren van droge weefsels met een vloeibaar epoxyhars zijn:

- Een constante kwaliteit, doordat de vezels niet gaan 'zweven' en vervormen tijdens het proces. Bij injecteren gebeurt dit gemakkelijk, zodat hiervoor een mate van overdimensionering noodzakelijk is om toch de gewenste sterkte/stijfheidseigenschappen te krijgen.
- Zeer geringe kans op luchtinsluitels (indien de juiste productiemethode wordt gehanteerd), wat met een injectietechniek moeilijk is te voorkomen.
- Hoog vezelvolumegehalte (65% vezel, 35% hars).

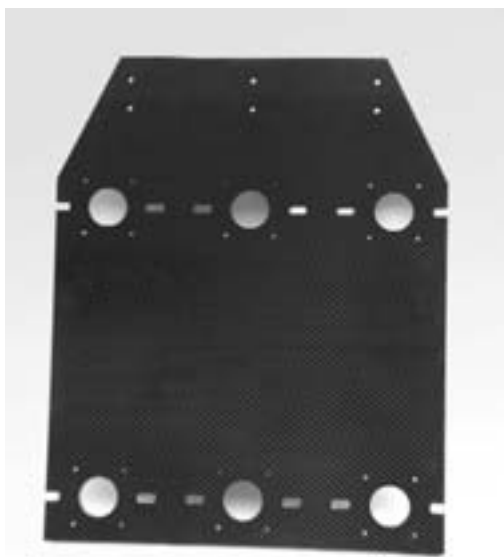
Carbonvezels dienen te worden aangebracht in richtingen waarin de trekspanningen plaatsvinden. De meeste constructies, zoals eerder gemeld, zijn stijfheidkritisch en slechts op punten sterktekritisch. Hier kunnen dan lokaal voorzieningen worden getroffen om dit op te lossen door extra laminaat aan te brengen.

Een eindige-elementen-analyse geeft een goede indruk van de krachten en interne spanningen van het product. Op basis hiervan maakt Refitech een laminaatopbouw waarbij zo optimaal mogelijk gebruik wordt gemaakt van het type weefsel en de dikte hiervan. Door de jarenlange ervaring met de opbouw van laminaten is een vezeloriëntatie snel gevonden. Deze oriëntatie wordt opnieuw doorgerekend tot optimalisatie van de opbouw. De berekeningen leiden tot een productvoorstel op basis waarvan prototypes kunnen worden vervaardigd.

Sandwich-constructies


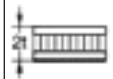

Een zeer goede combinatie om tot ongekend stijve en lichte constructies te komen, vormt de carbon-sandwich-constructie.

tie; zie Afbeelding 3 voor een voorbeeld. Door een kern (hoogwaardig schuim of honeycomb) te omkleden met een gesloten carbon-prepreg-huid, kan in analogie met een stalen I-profiel worden geconstrueerd. De trek- en druksterkte worden door de carbonhuid opgevangen, terwijl de torsiekrachten door het creëren van afstand tussen de lagen door het vulmateriaal worden tegengegaan; zie Tabel 4. Hierdoor ontstaat een in alle richtingen uitermate stijve en lichte constructie, die prijsconcurrerend is vanwege het geringe gebruik van carbon. Een bijkomend voordeel van een sandwich-constructie is dat deze uitermate goed thermisch isolerend is.



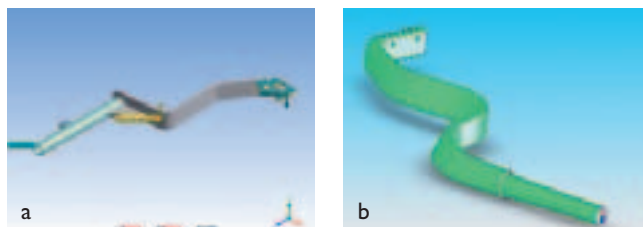
Afbeelding 3. Carbon sandwich-constructie voor een machine (door Refitech).

Tabel 4. Eigenschappen van een sandwich-constructie, in relatieve waarden (1,0 voor vol carbonmateriaal).

	Vol carbon-materiaal	Kerndikte = t	Kerndikte = 3t
			
Stijfheid	1,0	7,0	37,0
Buigsterkte	1,0	3,5	9,2
Gewicht	1,0	1,03	1,06

Is carbon duur?

Indien op een goede manier wordt geconstrueerd, hoeft een carboncomposiet-onderdeel niet duur te zijn. Met goed wordt dan bedoeld, dat het carbon niet puur het ‘oude’ metaal onderdeel dient te vervangen, maar dat een stuk re-engineering noodzakelijk is om verschillende onderdelen te integreren; zie Afbeelding 4 voor een voorbeeld. Ook dient ter afweging altijd het gehele proces onder de loep te worden genomen. Gewichtsbesparing kan leiden tot een verhoogde machinesnelheid, waarmee de output kan worden opgevoerd of waardoor geen investeringen in grotere aandrijvingen hoeven te worden gedaan. Tevens kan het gebruiksgemak toenemen (bijvoorbeeld zijn lichte armen en assen gemakkelijk te vervangen, waardoor omstellen wordt vereenvoudigd), of kan de installatie door één in plaats van twee servicemonteurs worden uitgevoerd. Reden genoeg om een huidig machineonderdeel te analyseren om te proberen tot een nieuw ontwerp met meerwaarde te komen.



Afbeelding 4. Optimaal profijt van toepassing van carboncomposiet vraagt om re-engineering.

- (a) Een traditioneel machineonderdeel uit RVS, gelast, gezet en gefreesd.
- (b) Hetzelfde machineonderdeel uit full carbon.

Auteursnoot

René Voogt is verantwoordelijk voor marketing & sales bij Refitech in Waalwijk.

Referentie

- [1] Timothy G. Gutowski (ed.), *Advanced Composites Manufacturing*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

Informatie

www.refitech.nl