



Werken met innovatieve materialen:

koudhardende kunststoffen

Marc De Moor

Inleiding

Even voorstellen...

Marc De Moor werd in 1963 geboren in een familie die al meer dan 45 jaar actief is in de distributie van koudhardende kunststoffen. Hij groeide op te midden van deze moderne en innovatieve producten. Door de constante toevoer van nieuwe materialen en steeds meer informatie over verwerkingstechnieken en producteigenschappen, was het al snel duidelijk dat dit 'zijn ding' zou worden. Vandaag staat Marc De Moor aan het hoofd van meerdere bedrijven die gespecialiseerd zijn in het verstrekken van adviezen en de verkoop van koudhardende kunststoffen en composieten.

Marc De Moor aan het woord

“Kunststoffen kan je niet meer wegdenken uit onze samenleving. Steeds meer mensen ontdekken de oneindige mogelijkheden van deze fascinerende materialen. Ikzelf heb het geluk gehad om ontelbare projecten van begin tot eindproduct te zien evolueren. Het proces van basisidee tot productie en afwerking heb ik meermaals van dichtbij mogen beleven.”

“Mensen die voorzichtig begonnen te experimenteren met deze producten, stichtten soms kleine eenpersoonszaken. Sommige zijn intussen internationaal bekende bedrijven geworden dankzij hun innovatieve karakter en de oneindige toepassingen van deze kunststoffen. Tijdens mijn bezoeken aan en voordrachten in scholen werd me steeds gevraagd naar een degelijk handboek, dat alle facetten van koudhardende kunststoffen zou belichten. Een boek dat niet alleen producten en processen zou toelichten maar bijvoorbeeld ook een goede leidraad zou zijn voor materiaal, gereedschap en verwerkingstechnieken. Welnu, dit is het resultaat. Ik heb getracht een boek te schrijven, dat voor iedereen toegankelijk is en waar je naast gedetailleerde informatie ook praktische elementen in vindt.”

Indeling en inhoud van dit boek

Dit boek telt drie delen:

Deel 1, is vooral geschreven voor wie nog nooit met kunststoffen heeft gewerkt maar meteen aan de slag wil gaan.

Deel 2, geeft praktische antwoorden en tips aan wie al een eerste ervaring achter de rug heeft en nog met enkele praktische vragen zit.

Deel 3, gaat dieper in op alle technische details en is gericht op professionals die al ervaring hebben met kunststoffen.

Doel van dit boek

“In dit boek vind je niet alleen een overzicht van de verschillende aspecten en eigenschappen van composieten, maar krijg je ook een heldere kijk op de praktische kant van hun kwaliteiten, vormgeving en hun oneindige toepassingen. De professionele gebruiker vindt er tal van tips in, en op de meeste vragen die me tijdens mijn loopbaan werden gesteld, probeer ik een zo duidelijk mogelijk antwoord te geven. Bij specifieke problemen zie je ook de concrete oplossing. Dit boek is zo opgesteld dat zowel studenten en leerkrachten als eindgebruikers en professionals een inzicht krijgen in het werken met koudhardende kunststoffen en composieten.”

“Met composieten kan je eindeloos mooie en originele dingen doen. Je kunt vormstukken een functionele ‘look’ geven, maar er kan veel meer. En als het voor jou inderdaad iets meer mag zijn, dan vind je in dit boek ongetwijfeld wat je zoekt. Werken met composieten is niet zo moeilijk, maar je moet de spelregels

respecteren. Ook die zijn niet zo moeilijk. Een van de belangrijkste aspecten is de temperatuur. Zo is het van belang de werkplaats maar ook de producten op een constante temperatuur te houden, zeker tijdens de verwerking. De temperatuur moet bij de verwerking tussen de 20 °C en de 23 °C bedragen. Verder kan je best een procedure opstellen voor de mengverhouding, de werkwijze en de droogtijden. Door de richtlijnen en de aangegeven verwerkinginformatie te respecteren, kan je sneller en efficiënter werken. Een consistente manier van werken zal ook de kwaliteit van je werk ten goede komen. En zo haal je tenslotte meer eer van je prestatie.”

“Tijdens klantenbezoeken kreeg ik meermaals de vraag of ik geen getalenteerde composietverwerker kende die meteen aan de slag kon. Het is belangrijk om voor een goede interne opleiding te zorgen en iedereen een basisopleiding te geven. Alles staat of valt tenslotte met de juiste voorbereiding. Daarom is het nuttig om vooraf ook enkele kleine praktische proeven te doen en de basistechnieken onder de knie te krijgen voor je echt aan de slag gaat. Zelfs in het bedrijfsleven raden wij aan om bepaalde handelingen te oefenen: laat mensen, bijvoorbeeld bij een lijmverbinding, deze handeling meerdere keren na elkaar op dezelfde manier uitvoeren. Zo kunnen ze ervaring opbouwen en routine ontwikkelen. Hiervoor heb ik ook handige starterkits¹ samengesteld. Die bevatten een samenstelling van de basisproducten met enkele toebehoren om direct mee aan de slag te gaan. Achteraan in het boek vind je verder informatie hierover.”

¹ zie achteraan voor meer info blz. 147

Deel 1

Wat zijn composieten?

De meest algemene definitie voor een composietmateriaal is dat het een combinatie is van twee of meer materialen, waardoor het de eigenschappen van de samenstellende materialen overneemt en hierdoor weer totaal nieuwe eigenschappen kan krijgen. Het ene materiaal, de matrix (hars), omvat en bindt het andere materiaal, meestal een versterkende vezel. In vergelijking met het meest gebruikte constructiemateriaal, staal, zijn kunststoffen gemiddeld honderdmaal minder stijf en tienmaal minder sterk. Dat compenseert de composietmaterialen voor een flink stuk door hun veel lagere soortelijk gewicht (of soortelijke massa: aantal kilogram per kubieke meter). Voor staal is dat 7800 kg/m^3 , terwijl de meeste vezelversterkte composieten slechts 900 kg/m^3 tot 1200 kg/m^3 halen, of gemiddeld 7 keer minder. Het zijn dus constructiematerialen die bestaan uit twee of meer duidelijk te onderscheiden fasen. Het zijn heterogene materialen (ongelijksoortig).

We kunnen de composieten onderverdelen in de onderstaande groepen:

Natuurlijke composieten (oudheid)

- Hout en bamboe
- Beenderen en tanden
- Hoorn
- Gedroogd leem dat versterkt werd met stro of bepaalde twijgen



Technische composieten (vroeger)

- Linnen in plaaster (sarcofaag)
- Gelaagd hout, zoals triplex en multiplex
- Kanonnen met een gelaagde loop
- Spaanderplaat (lijm met houtsnippers)
- Gewapend beton (betonijzers)



Nieuwe technische composieten (vandaag)

- Vezelversterkte composieten, zoals polyester met glasvezel
- Hoogwaardige of high performance composieten zoals epoxy met carbonvezel
- Natuurlijke composieten met bioharsen in combinatie met natuurlijke vezels zoals vlas, hennep, jute of kokosvezel
- Thermoplastische composieten



Kunststoffen van vroeger tot nu

De eerste pogingen op het vlak van macromoleculaire chemie waren niet zozeer bedoeld om nieuwe materialen te maken maar om bestaande natuurproducten te imiteren. Zo suggereerde Hooke al in 1644 om het werk van de zijderups na te bootsen. Het cultiveren van deze insecten was erg moeilijk en delicaat. Maar ons verhaal start eigenlijk in 1820, wanneer de Engelsman Thomas Hancock erin slaagt elastische linten te weven uit rubber. Adolf van Baeyer legt in 1860 de regels vast voor de polycondensatie² of de chemische binding van fenol en formol. En in 1846 ontdekt de Zwitser Schonbein het cellulosenitrat, dat de basis vormt voor de fabricage van celluloid, de eerste commerciële kunststof, geproduceerd door de Amerikaan J.W. Hyatt in 1868.

Een andere belangrijke ontdekking vond plaats rond de eeuwwisseling met de fabricage van kunsthoorn (galaliet) uit caseïne (eiwit uit melk). Polyvinylchloride (PVC) werd in 1835 ontdekt door de Franse natuurkundige Victor Regnault. Dankzij de Duitse scheikundige Fritz Klatte, die het fabricageproces heeft ontwikkeld, wordt de stof sinds 1912 industrieel gefabriceerd.

In 1938 startte de industriële PVC-productie op grote schaal. In 1900 had Edwin Brandenbergen het idee om een transparante verpakking te ontwikkelen voor voedsel. Met viscose als basisstof ontwikkelde de onderzoeker dertien jaar later 'cellofaan', de eerste flexibele folie die perfect dicht was en die ook vandaag nog steeds onontelbare toepassingen kent in het dagelijkse leven.

De scheikundigen Barker en Skinner hebben een organisch³ glas ontwikkeld: polymethylmethacrylaat (PMMA), dat in 1934 door Rohm op de markt werd gebracht onder de naam 'plexiglas'. Plexiglas wordt gebruikt voor het maken van onder meer lichtreclame en meubelen, omwille van de transparantie en de stevigheid van het materiaal.

Toen dr. Otto Bayer polyurethaan ontwikkelde, kon niemand vermoeden wat voor een succes deze stof zou worden. Nu heeft zij zich, dankzij meerdere generaties scheikundigen, ingenieurs en ontwerpers, ontwikkeld tot een universeel inzetbaar product. Begin 1940 werd verdere aanzet gegeven voor de ontwikkeling van meer en andere kunststoffen. Er was die periode een grote militaire nood aan lichte en sterke materialen voor het bouwen van vliegtuigen, boten en voertuigen.

² Is de chemische reactie van monomeren tot een polymeer, onder afsplitsing van een klein molecuul.

³ Komt oorspronkelijk van de verbindingen voortkomend uit levende wezens.



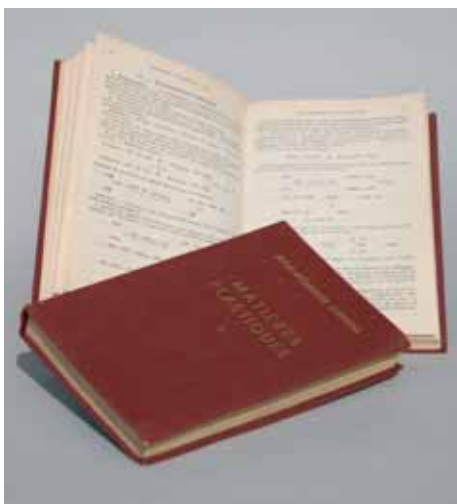
De toen snel ontwikkelende kunststofindustrie was op zoek naar nieuwe afzetmarkten en naar een verbetering van de mechanische eigenschappen.

Bakeliet (fenolhars) dankt zijn naam aan dr. Leo Bakeland (1863-1944), een Vlaming die begin twintigste eeuw experimenteerde met mengsels van fenol en formaldehyde, die versterkt werden met katoen- of vlasvezels. Het product werd in december 1909 gepatenteerd. Bakeliet behoort tot de thermoharders. Het is een materiaal dat makkelijk in vorm te brengen is en dan ook tal van toepassingen heeft. Denk maar aan deurklinken, telefoons, elektrische huishoudtoestellen,... Mede door de goede mechanische eigenschappen en het hoge isolerend vermogen werd het massaal gebruikt tot in de jaren '60, zowel voor industriële toepassingen als in toestellen voor dagelijks gebruik door particulieren.



De eerste glasvezel werd eigenlijk ontwikkeld in 1931 door Owens; de echte doorbraak en productie vond plaats vanaf 1935. Maar het product kreeg pas de volle aandacht tijdens de Tweede Wereldoorlog. Glasvezel kon uitpakken met sterke mechanische eigenschappen en werd vaak gecombineerd met polyesterhars (er kwam een patent voor polyester in 1936 en voor epoxy in 1938). Glasvezelversterkte kunststoffen werden voor het eerst gebruikt in 1940 voor marineboten. Een logische keuze, want deze boten moesten licht en sterk zijn en mochten niet rotten of roesten. Volgende toepassingen waren het elektrisch schakelbord in 1942 en de eerste vliegtuigonderdelen een jaar later.

Tijdens de jaren '60 werden de eerste high performance composieten ontwikkeld. Die werden onder meer gebruikt voor de helikopterwieken van de Alouette II en de carrosserie van de Corvette. Ze waren ook aanwezig bij de start van de ruimtewedloop, met de lancering van de Spoetnik in 1957, en als antwoord op de vraag naar temperatuurbestendige vezels en



Deel 2

Het ontwerpen met composieten

Composieten vormen een groep van materialen die voor constructieve doeleinden worden toegepast. De specifieke eigenschappen van deze materialen komen vooral tot hun recht wanneer hoge eisen aan vormvrijheid en een zo laag mogelijk gewicht gekoppeld zijn aan een hoge chemische en of mechanische belasting. Het zijn dus vaak kritische toepassingen waarvan het van belang is aan te tonen dat het product de vereiste eigenschappen bezit. Software vormt hierbij een onmisbaar stuk gereedschap. De constructieve analyses die aan composietconstructies worden uitgevoerd zijn niet afwijkend van die van staal. Vaak wordt de constructie gemodelleerd met een eenvoudige geometrie als plaat, balk, buis, doos of een stelsel daarvan. Daarin wordt het materiaal met zijn eigenschappen aangebracht en uitwendig belastingen worden gedefinieerd, aangevuld met de noodzakelijke veiligheidsfactoren. Ten slotte wordt berekend of de constructie voldoende weerstand biedt tegen deformatie en breuk. Het begrippenkader dat daarbij wordt gebruikt is ook niet afwijkend van dat van staal: spanning, stijfheid, rek, trek, druk, afschuiving, knik, plooivorming, kruip, vermoeiing en impact.

Kenmerkend voor vezel versterkte composieten is echter de laagsgewijze opbouw. Per laag kan de richting, hoeveelheid en aard van de vezel worden gekozen om de eigenschappen af te stemmen op de behoefte. Dat heeft belangrijke gevolgen voor de uit te voeren analyses: de eigenschappen krijgen een sterkte richtingsafhankelijkheid.

Er is sprake van eigenschappen per laag in plaats van alleen maar bulkeigenschappen.

De eigenschappen tussen de lagen onderling dienen apart bekeken te worden.

Het ontwerpproces omvat in het algemeen de fasen ontwerp, structureel ontwerp en ontwerp voor fabricage. Voor iedere van deze fasen zijn softwareproducten ontwikkeld. Soms zijn die modulair opgebouwd, waarbij verschillende onderdelen de verschillende fasen afdekken. Dat maakt dataoverdracht vaak een stuk eenvoudiger. Naast software die het product als uitgangspunt heeft, is er ook software met het proces als uitgangspunt. Ook die gaat uit van een 3D CAD-model waarop de afzonderlijke lagen zijn aangebracht. Na invoer van de juiste eigenschappen en parameters kan dan het proces worden gesimuleerd en geoptimaliseerd.

Hier verwijzen wij graag door naar Sirris, het collectief centrum van de Belgische technologische industrie.

Vorm = part shape = design

Voordat men de eigenlijke start geeft voor de aanmaak van een prototype of het mastermodel, dient men eerst grondig en doordacht de volgende vragen te stellen:

1/ Is mijn ontwerp geschikt voor een productie met composieten?

2/ Heeft het model de juiste vorm, zodat de goedkoopste fabricagetechniek kan toegepast worden?

3/ Kan men door het ontwerp bepaalde elementen zodanig aanpassen dat men sneller zal kunnen produceren?

4/ Kan men naast functionaliteit in het gebruik van het vormstuk ook, door de juiste materiaalkeuze, tot een extra comfort of resultaat geraken?

Hieronder enkele bedenkingen, waarmee men dikwijls geconfronteerd wordt tijdens het verloop van een productiecyclus.

Volume = serie size = afmetingen

Een belangrijke vraag voor de ontwerper is wat het volume, dus het effectieve aantal te produceren vormstukken zal zijn. Een andere vraag is: wat zijn de afmetingen die men wenst te realiseren? De productie van deelmallen brengt immers meer kosten met zich mee dan het werken in slechts één enkele mal. Ook de plaats die beschikbaar moet zijn om efficiënt te kunnen produceren is van belang, want ruimte is kostbaar. U kunt zich voorstellen dat voor het produceren van een bootje van 5 meter minder plaats nodig is dan voor een boot van 35 meter. De plaats die alleen al de mallen in beslag nemen, mag men niet onderschatten. Ik ken verwerkers die een stuk muur of een poort moesten afbreken omdat men anders niet meer het vormstuk uit de mal kon krijgen.

Malkosten = tooling cost = snelheid

Als tweede bedenking dient men te overwegen of het de moeite loont een negatiefmal aan te maken en zo ja, in welk materiaal. Immers, de malkosten worden verrekend in functie van het aantal stuks dat vervaardigd zal worden. Ook is de productietechniek dikwijls anders bij een kleine oplage, dan wanneer men spreekt over

enkele honderden of zelfs enkele duizenden vormstukken. Hoe groter het productievolume, hoe meer de mal hiervoor aangepast zal dienen te worden en hoe hoger de kostprijs hiervoor dan ook zal zijn. Stel dat men een honderdtal vormstukken zal moeten produceren, dan zal men ook met een levertermijn rekening moeten houden. Zo zullen de malkost en het verwerkingssysteem afhankelijk zijn van de termijn waarin men die 100 stuks zal moeten vervaardigen: binnen de week of binnen één maand? De verwerkings- en droogtijden van de producten moet men immers steeds mee opnemen in het productieschema. Gaat het in een bepaald project om slechts één reproductie, dan spreekt men over een one-off.

Vereisten = requirements = fysieke vereisten

Hoe wil men dat het eindresultaat er zal uitzien? Zijn er eisen die naast de sterkte en gewicht ook deel kunnen uitmaken van de klantwens? Moet het vormstuk chemisch bestendig zijn en bij welke temperaturen? Is het kortstondig of gedurende een langere tijd? Stel een lijst op met de producten en de temperaturen waartegen het vormstuk bestand dient te zijn. Leg die lijst voor aan de materiaalleverancier. Hij is het beste geplaatst u hierin te adviseren.

Vormvastheid = stability = nauwkeurigheid

Soms is de nauwkeurigheid van het vormstuk een van de belangrijkste parameters. Men dient immers te weten dat de maatvastheid al tijdens de aanmaak van het prototype mede bepaald dient te worden. Professionele mallenmakers houden immers rekening met de krimp die er kan optreden in de mal en in het vormstuk dat nadien in de mal zal geproduceerd worden. Sommigen maken doelbewust het prototype iets groter, zodat de 'dubbele krimp' geen effect meer heeft op de uiteindelijke afmetingen van het vormstuk. Andere mallenbouwers opteren dan weer voor krimpvrije mallenbouwsystemen, met speciaal aangepaste producten die tijdens het uitharden niet krimpen. Hiervoor zet men ook dikwijls epoxyssystemen in, die wel iets duurder zijn dan de traditionelere mallenbouwsystemen, maar qua duurzaamheid en bij toepassingen bij verhoogde druk en temperatuur weer beter presteren.

Vlambestendigheid = fire and smoke = attest

Met de Europese richtlijnen verscherpt men de eisen inzake het brandgedrag van bepaalde onderdelen of elementen die men uit composieten wenst te vervaardigen. Niet enkel de vlambestendigheid en de zelfdoovendheid, maar ook, indien het materiaal toch vlam zou vatten, de mogelijke rookontwikkeling. Deze bepalingen staan meestal goed en duidelijk omschreven per toepassing. Zo zal een vormstuk voor in tunnels of ondergrondse metro's strenger worden gereguleerd dan vormstukken voor bovengrondse toepassingen. Ook hier verdient het aanbeveling om zich eerst goed te laten adviseren door specialisten.

Temperatuur = heat = vervormbaarheid

Bepaalde onderdelen, zoals bv. de uitlaat van een motorfiets, kunnen enorm heet worden, sommige zelfs warmer dan de opgegeven HDT⁸ van het aanbevolen hars. Ook hier telt de juiste combinatie van hars en vezel, zodat de vezels een gedeelte van de warmte kunnen opnemen of wegnemen. Zelfs in toepassingen met water is de temperatuur van het water van groot belang. Neem bv. de watertemperatuur van een verwarmd zwembad bij 28 °C. Het warme water zal in combinatie met de aanwezige chloor agressiever reageren en daardoor sneller inwerken op de eindlaag.

Isolatie = isolation = dikte

Vormstukken moeten soms voorzien zijn van een isolatielaag. Hier is dan interessant om het schuimtype dat men wenst te gebruiken als sandwichmateriaal eveneens dienst te laten doen als thermische isolatie. Sommige vormstukken dient men elektrisch te isoleren en andere moeten goed geleidend werken. Ook hier dient er op voorhand vastgelegd te worden welke eigenschappen men wenst te verkrijgen. Elke isolatie heeft zo haar beperking of minimale laagdikte. Zo zal een paneel dat zal worden gebruikt als koelkastdeur een minimum laagdikte van 80 mm moeten krijgen, bij een PUR-schuim. Indien men tijdens het ontwerp slechts een dikte van 50 mm zou hebben voorzien, zal men nooit de optimale isolatiewaarde verkrijgen. Het vooraf bepalen van die eigenschappen is dus een absolute must. In functie van de beschikbaarheid van het geschikte product zal men dan het design hieraan moeten aanpassen.

Mechanische vereisten = loads = belasting

Uiteraard horen de mechanische eigenschappen tot de belangrijkste elementen die door de designer vastgelegd zullen moeten worden. Hier komt dan ook de belangrijkste troef van composieten naar voren. Door op voorhand al een indicatie te krijgen van welke mechanische belasting er zal plaatsvinden op het vormstuk, kan men specifiek die plaatsen extra versterken of voorzien van een sandwichstructuur, zodat de belasting evenwichtig over het vormstuk zal verdeeld worden. Door de jaren heen heeft men tal van standaardrichtlijnen ontwikkeld die men eenvoudig kan hanteren.

Stijfheid en sterkte = stiffness = laagdikte

Ook hier komen de sterke eigenschappen van composietmaterialen naar voor. Stijfheid is hier gelijk aan laagdikte. Dus willen we een sterk en stijf laminaat, maar zo dun mogelijk. Dan zullen we het hars en de vezels hiervoor moeten aanpassen. Ook de vezelrichting waarin we de stijfheid wensen te verkrijgen, zullen mee in het ontwerp moeten opgenomen worden en eventueel een sandwichconstructie in overweging moeten nemen

Verbindingen = joints = zwakste schakel

Sommige vormstukken kunnen onmogelijk in slechts één stuk vervaardigd worden, maar in delen die met elkaar verbonden worden. Ook hier is design in vele opzichten een goede steun. Kan zo een verbinding ook samengesteld worden indien men ze eenvoudig zou kunnen verlijmen? Mallenbouwers ontwerpen hun mallen zo dat de composietverwerker de verschillende onderdelen van de mallen stuk voor stuk aan elkaar kan verbinden tijdens het lamineren. Zo kan het vormstuk toch uit één stuk kan geproduceerd worden.

Milieu = eco = recyclage

Tegenwoordig moeten ontwerpers meer dan ooit rekening houden met de recycleerbaarheid van het materiaal. Daarom is het van belang de ontwerpen zo samen te stellen dat de keuze van de gebruikte materialen en de herbruikbaarheid goed uitgebalanceerd zijn. Vandaag bestaan er polyesterdelen die al meer dan 35 jaar in gebruik zijn. Onderzoeken in de VS hebben aangetoond dat marineschepen die 30

jaar geleden werden gebouwd, vandaag nog steeds dezelfde mechanische eigenschappen bezitten als toen. Hiermee heeft men willen aantonen dat composieten duidelijk langer meegaan dan traditionele materialen. Ook worden composieten daar toegepast waar men de levensduur van het vormstuk voor een langere periode wil veiligstellen. Composieten worden vandaag nog niet echt hergebruikt in nieuwe toepassingen. De oorzaak hiervan moeten we vooral zoeken in de kosten die voorlopig nog te hoog uitvallen voor het vermaken tot herbruikbare vulstoffen. De actuele kostprijs van 'nieuwe grondstoffen' ligt ongeveer 15 % lager dan de 'hergebruikte' materialen. Hier moeten de thermoharders hun meerdere erkennen in de thermoplasten. Deze laatste zijn eenvoudiger en dus ook goedkoper te recyclen. Styreen en de problematiek rond solventiemissies maken dat de composietverwerkers alert moeten blijven en openstaan voor innovatieve ontwikkelingen.

Kosten = costs = haalbaarheid

Alles staat of valt met de kostprijs. Composieten zijn over het algemeen duurder in de grondstofprijs t.o.v. thermoplasten. Maar hier staan wel de veel hogere malkosten tegenover. Ook het minimaal aantal te produceren vormstukken bij de thermoplasten maakt dat men dikwijls toch kiest voor de iets duurdere oplossing. Composieten hebben voordelen m.b.t. stijfheid, sterkte en gewicht. Kleine productieaantallen, geen of slechts een kleine investering in gereedschappen en mallen, maken dat composieten meer en meer worden toegepast.

Prototyping – mallenbouw Plug = master = model

Het menselijke oog is eraan gewend alle dingen in het positief te zien. Bovendien laat een model met een positieve ronding zich het snelst bewerken. Daarom is het aan te bevelen eerst een positieve master of plug te maken, opdat men de omtrek en de verhoudingen beter kan schatten en daardoor de kwaliteit van het prototype beter kan beoordelen.

Polyestervormstukken worden overwegend in polyestermallen vervaardigd. Ze krijgen daarbij meestal een eenzijdig glad oppervlak. Een mal stelt als het ware de afdruk van het model voor.

Al naar gelang van de grootte van het model, kan men de eerste plug of prototype uit de onderstaande materialen vervaardigen:

- 1/ Balsahout (MDF of ander gelijkmatig en zacht hout)
- 2/ Spaanplaten of hardboardplaten
- 3/ Resopal- of formicaplatten met hard melamine-oppervlak

⁸ De warmtevervormingstemperatuur is een waarde die enig inzicht geeft in de temperatuurbestendigheid van de matrix.

Gelatinrubber

Hersmeltpbare gietmassa's kunnen economisch voordeliger zijn doordat ze meermaals herbruikbare en toch kwalitatief hoogwaardige mallen opleveren. Maar ze zijn niet altijd praktisch en veilig in het gebruik door de hoge temperaturen en de dampen. Daarom worden ze weinig gebruikt. Om vloeibaar te worden, moet deze gietrubber verwarmd worden tot bijna 130 °C. Er bestaan twee varianten:

1/ Een witte soort met een hogere alkaliënbestendigheid

2/ Een rode met een betere styreenbestendigheid.

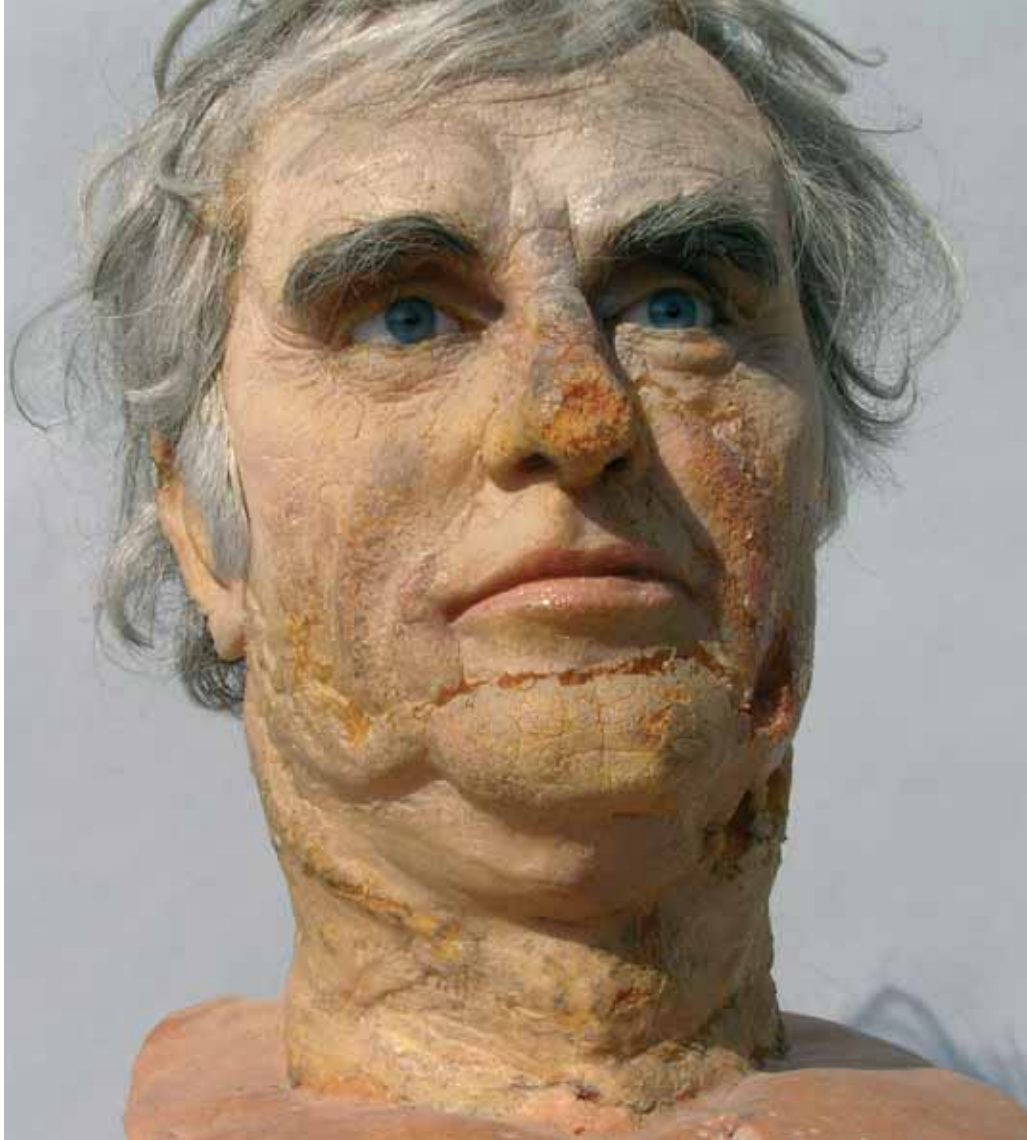
Als men regelmatig kleinere reeksen moet maken van verschillende vormen, dan is dit product een veel goedkopere oplossing dan bv. siliconenrubber.

Voordelen:

- Hersmeltpbaarheid van de mal
- Bestand tegen alkaliën en styreen
- Meerdere keren herbruikbaar

Nadelen:

- Hogere kostprijs
- Temperatuurbestendigheid van de ondergrond of plug
- Dampen tijdens het opwarmen



Alginaat

Dit product wordt geleverd in poedervorm en moet men aanlengen met water. Na reactie krijgt men een zeer zachte gietrubber. Ideaal om afdrucken van het menselijk lichaam mee af te gieten. Men mag het materiaal rechtstreeks op de huid aanbrengen en omdat de reactie maar enkele minuten duurt, hoeft het model niet al te lang stil te liggen. Het nadeel van dit materiaal is dat de rubbermal maar een paar dagen (2 à 3) houdbaar is. Het aanwezige vocht zal immers verdampen waardoor de mal in feite uitdroogt.

Dat nadeel kan men omzeilen door snel een afgietsel te maken met gips of plaaster. Zo kan men toch de originele vorm bewaren. Met deze nieuwe vorm kan men dan verder werken, om bijvoorbeeld met siliconenrubber een definitieve rubbermal te vervaardigen.

Bij het gebruik van giethars in alginaatrubbers kan men enkel giethars gebruiken op waterbasis of die compatibel is met vocht, want alginaat blijft altijd een beetje vochtig.

Voordelen:

- Zeer snelle uitharding
- Zeer gedetailleerde overname mogelijk
- Neutraal product

Nadelen:

- Beperkt houdbaar
- Compatibel met water
- Extra stap in de malproductie

Regels voor het gebruik van losmiddelen

Poreuze modellen moeten eerst behandeld worden met een verzegelingslaag (gellak, vernis of verzegelingslak). Bij sterk zuigende ondergrond kan het nodig zijn de behandeling enige malen te herhalen. De verzegelingslaag met een kwast aanbrengen. Voldoende maar niet te veel opbrengen. Overtollig materiaal direct verwijderen. Een half uur laten uitdampen alvorens de volgende lagen aan te brengen. Laat deze verzegelingslaag minimaal één week drogen voordat men aan de productie van de mal start. Immers, nog niet volledig opgedroogde laklagen zullen silicone laten doen kleven en aanhechten.

Losmiddelen

Om tegemoet te komen aan de verschillende vragen van de professionele composietverwerker, zijn er tal van nieuwe losmiddelen ontwikkeld. Vanuit milieustandpunt – en in het bijzonder met het oog op het gebruik van solventen – zijn de losmiddelen met solventen nagenoeg volledig aan het verdwijnen en worden ze vervangen door wateraangedreven systemen. Uiteraard brengt dit de nodige aanpassingen en werkvoorbereidingen met zich mee. Zo zal bv. bij het overschakelen van een vast naar een vloeibaar watergedragen losmiddel de aanbrengtijd en de droogtijd van het losmiddel invloed hebben op het productieproces. Ook door toedoen van verhoogde productieritmes komen er nieuwe problemen voor op de mallen, zoals de vorming van styreenafzetting. Hier ontstaan weer tal van nieuwe producten, die dit euvel trachten te voorkomen of op te lossen.

Vloeibare losmiddelen

We onderscheiden solventhoudende en watergedragen systemen. Het voordeel van de oplosmiddelgebaseerde producten is de snelle verdamping en dus opdroging van de waslaag. Daardoor kan men sneller werken en is de wachttijd voor het aanbrengen van meerdere lagen korter. Verder is het van belang de verschillende types van ondergrond te kennen. Er zijn immers losmiddelen die speciaal ontwikkeld zijn voor metaal en inox. Andere hebben dan weer een betere lossing uit composietmallen. Uiteraard speelt de temperatuur van de mal alsook de temperatuursontwikkeling van het harssysteem tijdens het uitharden een zeer belangrijke rol. Het zou immers kunnen dat de temperatuur zo hoog oploopt dat het losmiddel smelt en daardoor zijn werking verliest, waardoor het vormstuk vast komt te zitten in de mal.

Het voordeel van een watergedreven losmiddel is dat het bijna reukloos is en gebruiksvriendelijk en meestal eenvoudig in gebruik. Zodra ze zijn uitgehard, zijn beide systemen – solvent- of watergedragen – aan elkaar gewaagd. Binnen het gamma van vloeibare losmiddelen bestaan er ook de zgn. semipermanente losmiddelen. Deze generatie van producten legt een soort film of 'teflon'-laagje boven op het maloppervlak. Hierdoor dient men niet elke keer opnieuw de mal van een losmiddel te voorzien, wat op zich weer kostenbesparend werkt.

Verder is er nog een losmiddel in een handige spuitbus. Dit middel is meestal universeel en daardoor zowel voor polyester, epoxy, polyurethaan als voor silicone toe te passen.

Vaste losmiddelen

De vaste wassen bevatten steeds een klein beetje oplosmiddel, dat na het aanbrengen zal verdampen. Het voordeel van deze wassen is dat het percentage oplosmiddel laag is en dat ze hierdoor snel opdrogen. Nadien kan men het oppervlak ook zeer goed polijsten. Dit kan van belang zijn voor vormstukken die een hoge glansgraad moeten krijgen. Ook zal het verbruik van een vaste was iets lager liggen dan die van een vloeibaar equivalent. Een vaste was heeft tevens een iets meer 'vullende' werking. Daardoor zullen fijnere krasjes en pinholes opgevuld kunnen worden.

Interne losmiddelen

Dit zijn losmiddelen die voordien onder het hars of de gelcoat kunnen gemengd worden. Daardoor moet men de mal niet behandelen met een losmiddel. Dit losmiddel heeft de eigenschap zich naar het maloppervlak toe te richten en zodoende de aanhechting te verhinderen. Uiteraard zal dit nadien geen invloed meer hebben op de mogelijke hechting van een lak of lijm die nog aangebracht dient te worden op het vormstuk. Dit type van losmiddel is oorspronkelijk ontwikkeld voor de pultrusietechniek. Eigenlijk is het een combinatie van losmiddel en glijmiddel. Vervolgens is men het meer en meer gaan gebruiken in toepassingen van polyesterbeton (polymeerbeton).

Latex vormrubber

Deze vormrubber wordt niet enkel in de mallenbouw toegepast, maar eveneens als losmiddel. Doordat de latex reageert op de luchtvochtigheid, zal hij ook uitharden op iets vochtige ondergronden zoals gips of klei. In de orthopedische sector giet men dit latex in de gipsafdruk van de voet, zodat men een vlotte lossing verkrijgt van het PUR-schuim dat erin wordt gegoten.

Veel gebruikte matrices

1/ Polyester (UP)

Polyesterharsen en hun eigenschappen

Er is een grote diversiteit aan polyesterharsen, waarbij de voornaamste overeenkomst de bereiding is. De bereiding van ester is een condensatiereactie tussen een zuur en een alcohol, waarbij water als condensatieproduct vrijkomt.

Wil men in dit soort reacties een goed rendement behalen, dan moet men het water direct verwijderen zodat het evenwicht naar rechts verschuift; ook kan men gebruik maken van zuuranhydriden. Wanneer bij deze bereiding gebruik wordt gemaakt van onverzadigde zuren of alcoholen, ontstaan onverzadigde polyesters. Dit zijn juist de types die in de composietbranche worden toegepast. Uit praktisch oogpunt wordt meestal een combinatie van een onverzadigd zuur en een verzadigd zuur gebruikt, om de reactiviteit van het hars te kunnen instellen.



Om de gevormde polyester verwerkbaar (opgelost) te houden, worden vloeistoffen (monomeren, meestal styreen) toegevoegd om zo de viscositeit laag te houden. Tevens kan deze vloeistof dienst doen als ketenkoppelaar bij het uithardingproces. De eerste patenten dienaangaande zijn van 1936. De factoren die de eigenschappen van de uiteindelijke polyester bepalen, zijn:

1/ Type en hoeveelheid zuur

Het zuur bevat de onverzadigde bindingen. De vernettingsdichtheid van de uiteindelijke polyester wordt bepaald door de hoeveelheid onverzadigd zuur. Weinig onverzadigde verbindingen geven minder crosslinks. Deze polyester is dan flexibeler (lagere E-modulus) en warmte- en oplosmiddelgevoeliger en heeft vaker een langere uithardingtijd.

Deel 3

Verschillende fabricagesystemen voor de verwerking van composieten

Gieten

Onversterkte harsen kunnen, waar het de verwerking en toepassing betreft, worden onderverdeeld in twee groepen:

1/ Ongevulde, al dan niet gepigmenteerde harsen

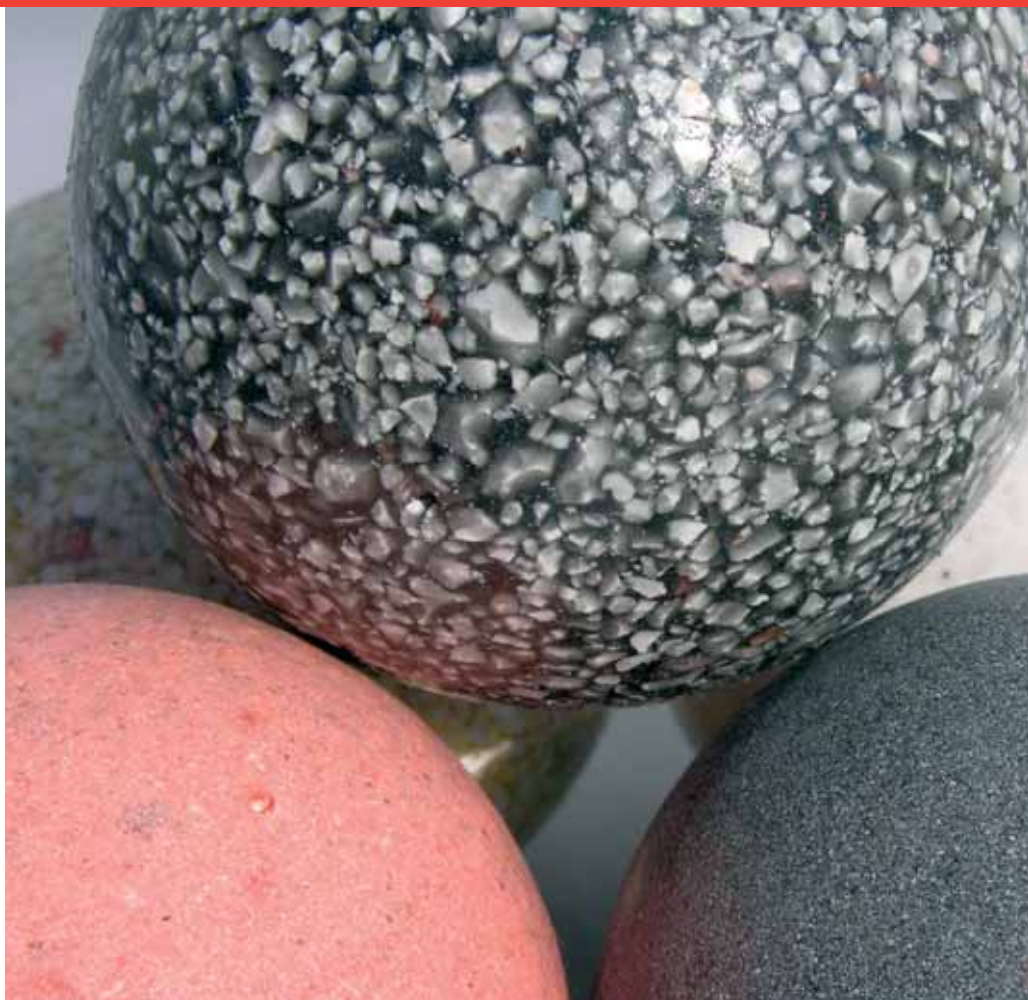
Het aantal toepassingen voor onge vulde harsen is betrekkelijk beperkt. Bekend zijn vooral de inbeddingen van allerlei voorwerpen in een glashelder giethars. Het betreft in hoofdzaak decoratieve toepassingen, show-voorwerpen en dergelijke. Een weinig bekende maar vaak gebruikte toepassing is het maken van knopen.

2/ Gevulde harsen, die gietbaar zijn

Dit is veruit de belangrijkste toepassing van polyesterhars. Het aantal toepassingen is zeer groot. Hier zijn drie hoofdgroepen te onderscheiden:

a/ Polyestermermer, onyx en gevuld materiaal dat wordt toegepast in platen of gevormde producten, zoals wastafels, tabletten en figuren.

Hierbij wordt gebruik gemaakt van de eigenschap dat harsen grote hoeveelheden vulstoffen kunnen opnemen. Dit kan van 5 tot 6 delen vulstof t.o.v. het gebruikte hars. De gebruikte vulstoffen zijn gemalen en bevatten geen grove delen. Veel gebruikte vulstoffen bij deze methode zijn krijt, talk, aluminiumoxide. Het spreekt vanzelf dat de te gebruiken vulstoffen droog moeten zijn en geen invloed mogen uitoefenen op de uitharding van het hars.



b/Vaak worden mengsels van diverse vulstoffen toegepast om bepaalde effecten te bewerkstelligen, of om een hoge vulgraad in combinatie met goede gietbaarheid en ontluchting te krijgen. Hier spreekt men ook over polyesterbeton (polymeerbeton), als vervanger van het conventionele beton, voor producten die aan speciale eisen moeten voldoen. Polyesterbeton kan men beschouwen als gewoon beton waarin cement en water vervangen zijn door polyesterhars met vulstoffen. Polyesterbeton is uiteraard duurder dan het conventionele beton, maar er staan een aantal voordelen tegenover, die het gebruik rechtvaardigen. Het betreft dan producten die een grotere sterkte vereisen, een betere afwerking bezitten of een zekere chemische resistentie moeten verkrijgen. Een groot voordeel is dat er geen staalwapening nodig is. Hierdoor kan sneller geproduceerd worden en zal er tevens geen corrosie meer plaatsvinden. De vulstof bij deze productiemethode is gewoon zand of zandmengsels met

een maximale korreldoorsnede van 3 mm.

c/ Zeer hoog gevulde harsen (van 6 tot 10 delen vulstof t.o.v. het hars, die niet meer gietbaar zijn. De Breton-methode is die waarbij hars als bindmiddel wordt gebruikt om marmerafval te verwerken tot o.a. plaatmateriaal. Bij de winning en verwerking van natuurlijk marmer komt zeer veel marmerafval vrij, dat verbrokken en/of vermalen wordt. Dit marmerafval kan met behulp van polyesterhars verwerkt worden tot platen en tegels die niet voor natuurlijk marmer moeten onderdoen. De marmerdeeltjes variëren van fijn stof tot brokken van circa 20 cm doorsnede. Al deze gradaties moeten in uitgekiende hoeveelheden gebruikt worden om een zeer hoge vulgraad te verkrijgen. Het harsgehalte in het eindproduct is extreem laag (4 tot 6 %). Zo kunnen er blokken geproduceerd worden van 300 x 100 x 120 cm. Deze worden nadien verzaagd in de gewenste dikte en afmetingen.

Normtesten¹⁵

De meeste normtesten voor composietlaminaten zijn opgesteld door ISO (International Organization for Standardization), ASTM (American Society for Testing and Materials) en DIN (Deutsches Institut für Normung). De keuze van de norm hangt vaak af van het afzetgebied van het materiaal (Europa -> eerder ISO, Amerika -> eerder ASTM), het lastenboek van de opdrachtgever, de ontwerper,... Door het gebruik van normtesten wordt gegarandeerd dat de gemeten eigenschappen van het composietlaminaat uitgevoerd zijn volgens internationaal aanvaarde standaarden, en dat een vergelijking met gemeten waarden voor andere composietlaminaten mogelijk is, als ze volgens dezelfde norm getest zijn. Uiteraard wordt het aantal normtesten altijd beperkt tot een set van testen die relevant is voor het toepassingsgebied van de composietcomponent, zijn belastingscondities, zijn levensduur, enz. Het heeft bv. geen zin om impacttesten uit te voeren op een component die nooit aan enige impactbelasting zal onderworpen worden. Het gebruik van normtesten houdt ook een aantal impliciete kwaliteitsregels in:

- De gebruikte meetinstrumenten worden regelmatig gekalibreerd (bv. krachtcel voor het meten van de krachten tijdens de mechanische testen, balans voor het bepalen van het vezelvolumegehalte, ...);
- De testen worden uitgevoerd bij normale omgevingscondities (temperatuur en vochtigheid), tenzij natuurlijk anders gespecificeerd. Gezien de temperatuurgevoeligheid van kunststoffen geniet een geklimatiseerde ruimte de voorkeur;
- Er wordt een testverslag opgemaakt waarin de condities van de testen worden opgenomen, en de resultaten worden gepresenteerd.
- We onderscheiden binnen de normtesten de fysische testen en de mechanische testen.

Fysische testen op composietlaminaten

Met de fysische eigenschappen van composietlaminaten bedoelt men typisch de dichtheid en de thermische en elektrische eigenschappen. Voor composietlaminaten bepaalt men in de eerste plaats de dichtheid (en bijhorend het vezelvolumegehalte en het porositeitgehalte) en de thermische uitzettingscoëfficiënt. Eventueel kan men ook de glastransitietemperatuur en de smeltemperatuur (voor thermoplastische composieten) bepalen.

Dompelproef

Met behulp van de dompelproef bepaalt men de dichtheid van het composietlaminaat. Het laminaat wordt eerst gewogen in droge toestand en daarna ondergedompeld in gedemineraliseerd water. Door toepassing van de wet van Archimedes vindt men de dichtheid [kg/m³] van het composietlaminaat. Uiteraard is een zeer precieze en gekalibreerde analytische balans vereist (zie figuur 3).



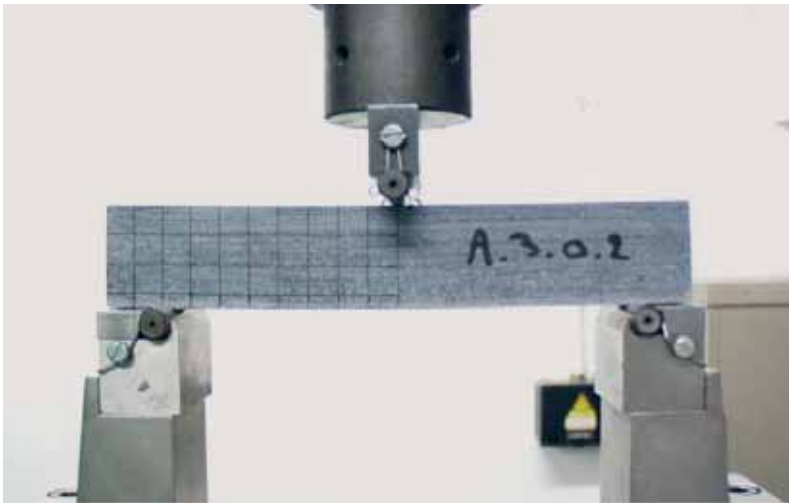
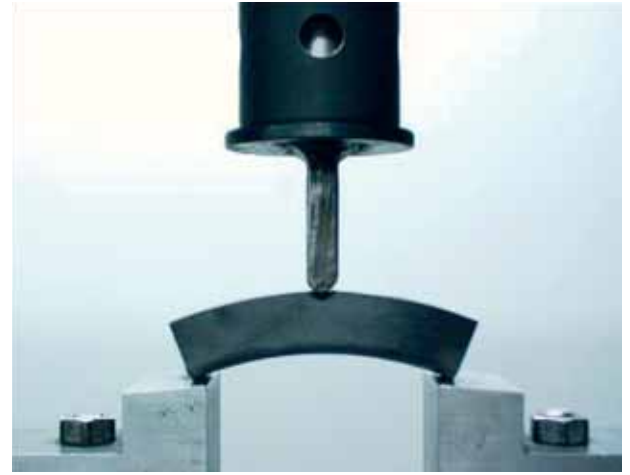
Figuur 3 Analytische balans voor dompelproeven

Vezelvolumegehalte

Voor het bepalen van de vezelvolumefractie van het composietlaminaat moet men de massafractie bepalen van het hars en van de vezels in het composietlaminaat. Bij glasvezelcomposieten gebeurt dat door een verbrandingsproef, waarbij het hars wordt gecarboneerd. Bij koolstofvezelcomposieten tast deze proef echter ook de koolstofvezel zelf aan, en wordt gebruik gemaakt van zuren die het hars oplossen. Als men dan ten slotte de dichtheid van het hars en de vezel afzonderlijk kent, kan men de vezelvolumefractie berekenen. Het porositeitsgehalte wordt nooit gemeten, maar altijd berekend uit de resultaten van de dompelproef en verbrandingsproef/zuurproef. Figuur 4 toont de verschillende stadia in de zuurproef voor de bepaling van het vezelvolumegehalte van koolstofvezelversterkte laminaten. Eerst wordt het hars opgelost in een zuur, nadien worden de overblijvende koolstofvezels gespoeld en ten slotte gedroogd.



Figuur 4 Verschillende stadia in de zuurproef voor bepaling van het vezelvolumegehalte van koolstofvezelversterkte laminaten



Figuur 14 Korte buigproef op koolstof/epoxylaminaat (linksboven), korte buigproef op gewikkeld koolstof/epoxysegment (rechtsboven), korte buigproef op polyesterhars met polyesterweefsel (linksonder) en korte buigproef op licht gekromd koolstof/epoxylaminaat (rechtsonder)

Afschuifproef (rail shear, $\pm 45^\circ$)

Het testen van het afschuifgedrag van composietlaminaaten kan op verschillende manieren, elk met hun eigen voor- en nadelen. De eenvoudigste methode is de 'bias tension'-test of trektest op een $[+45^\circ/-45^\circ]_{ns}$ laminaat. Het proefstuk wordt geïnstrumenteerd met een langs en dwars rekstrookje. Tijdens de trektest meet men de kracht F , de langse rek ϵ_{xx} en ϵ_{yy} . Men kan aantonen dat dan geldt:

$$\tau_{12} = \frac{F}{2 \cdot b \cdot h}$$

$$\gamma_{12} = \epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}$$

Daarbij zijn τ_{12} en γ_{12} de schuifspanning en glijding van de individuele laag van het $[+45^\circ/-45^\circ]_{ns}$ laminaat. Door het fitten van de raaklijn aan de $\tau_{12} - \gamma_{12}$ -curve, verkrijgt men de glijdingsmodulus G_{12} . Het is belangrijk op te merken dat deze test geen

zuivere schuifspanningstoestand veroorzaakt in het laminaat, want er zijn ook rekken langs en dwars op de versterkingsvezels, die onder $+45^\circ$ en -45° liggen t.o.v. de belastingsrichting.

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = \frac{\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}}{2}$$

Gezien het tegengestelde teken van ϵ_{xx} en ϵ_{yy} bij een trektest in de 'x'-richting, zijn deze rekken ϵ_{11} en ϵ_{22} wel beperkt.

Meestal vertoont een dergelijk $[+45^\circ/-45^\circ]_{ns}$ laminaat een sterk niet-lineair gedrag, met grote vervormingen vóór breuk.

Een minder gebruikte variant is de 10° off-axis test, waarbij alle vezels van een unidirectioneel laminaat worden georiënteerd onder een hoek van 10° met de belastingsrichting. Ook dan is er een sterke schuifspanning aanwezig, maar de breuk treedt op bij veel kleinere vervorming.



Algemene vaardigheden

Algemene formules:

Pi = 3,14

R = straal van de cirkel

D = diameter

Oppervlakte:

Rechthoek: lengte x breedte

Cirkel: $\pi \times R \times R$

Driehoek: (hoogte x basis) gedeeld door 2

Volume van een rechthoekige bak: lengte x breedte x hoogte

Volume van een buis: $\pi \times R \times R \times \text{lengte}$

1 liter = 1000 ml = 1 dm³.

Een kubus van 1 m³ water weegt 1000 kg of heeft dus een volume van 1000 liter en heeft de afmetingen van 1 meter x 1 meter x 1 meter.

Omtrek van een cirkel: $\pi \times \text{diameter}$

Massa: volume x soortelijke massa (sg)

Soortelijk massa: massa delen door het volume

Volume: massa delen door de soortelijke massa

Hoe kan men het sg bepalen van een product?

Vul een maatbeker van 1000 cc met het product en weeg dit nauwkeurig.

Stel: het gewicht is 830 g. Dan is het sg 1,2.

Als een hars een sg heeft van 1,2 dan wordt dat 1000 delen door 1,2 = 833 ml.

Procenten:

1 % = 1:100ste

1 gewichtsprocent van 1000 g = 10 g

1 volumeprocent van 1 l hars met een sg van 1,2 = 8,33 ml

Uitzettingen van schuim:

Deel 1000 (1 m³) door de densiteit van het schuim en men verkrijgt de uitzetting in volume.

Bv. Hoeveel zet een schuim uit met een densiteit van 400 kg/m³? $1000 : 400 = 2,5$.

Dus het schuim zal 2,5 keer zijn volume uitzetten of, m.a.w., men heeft 25 kg nodig van het 400 kg/m³-schuim om 1000 liter vol te schuimen.