



Delft University of Technology

Harsinfusie

(not) safe for designers - XVIII

Tempelman, Erik

Publication date

2022

Document Version

Final published version

Published in

De Constructeur

Citation (APA)

Tempelman, E. (2022). Harsinfusie: (not) safe for designers - XVIII. *De Constructeur*, 62(1), 16-20.

Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).
Please check the document version above.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Harsinfusie

(NOT) SAFE FOR DESIGNERS – XVIII

De James Bond-film 'The Spy Who Loved Me' uit 1977 had een opvallende bijrol voor een hagelwitte Lotus Esprit. Dankzij enige 'customizing' door Q Branch gaf deze sportauto zelfs onder water de slechteriken het nakijken. De amfibische ombouw was nog snel uitgevoerd ook, want de Esprit kwam slechts één jaar eerder op de markt, in 1976 (afbeelding 1).

ERIK TEMPELMAN, ADVIESBUREAU ERIKTEMPELMAN.COM,
UNIVERSITAIR HOOFDDOCENT TU DELFT – INDUSTRIEEL
ONTWERPEN
MAARTEN LABORDUS, R&D MANAGER BIJ KVE COMPOSITES
BV, GAST-COAUTEUR

Ook buiten het witte doek baarde deze auto opzien, mede dankzij zijn innovatieve en vederlichte constructie. De Esprit had een stalen 'backbone frame' met daarover glasvezelcomposiet schaaldelen, die op hun beurt waren gemaakt met een revolutionair proces: vacuum assisted resin infusion (VARI, afbeelding 2).

Harsinfusie: wat kun je ermee?

Het VARI-proces is een variant van een groep technieken die we gezamenlijk zullen aanduiden als 'harsinfusie'. En het is niet de enige: zo zijn er ook nog '(structural) resin injection moulding', 'resin transfer moulding', 'vacuum bagging', en meer. En

dan zijn er nog de vele, doorgaans weinig informatieve afkortingen, zoals SCRIMP, VARTM, en RFI. Kortom, enige 'resin confusion' is er zeker! Toch is het principe simpel – even geduld.

Harsinfusie is geschikt voor kleine tot middelgrote series van composiet onderdelen. Wie fors durft te investeren, kan er ook grote series mee in de markt zetten. Een voorbeeld van dit laatste is de bodyshell van de BMW i3, die sinds 2013 met een variant van harsinfusie wordt gemaakt. Hun opzet heeft een taktijd van slechts 5 min. Maar 'one-offs' kunnen ook: zo werd de baanfiets van topwielrenner Theo Bos uit 2006 ook met harsinfusie gemaakt.

Met de term 'composiet' bedoelen we hier een vezelversterkte kunststof met lange ('continue') vezels. Twee populaire combinaties zijn polyesterhars met glasvezels en epoxyhars met koolstofvezels. Maar er is meer mogelijk. Zo zijn er diverse plantaardige vezels, zoals vlas en hennep, en sinds kort ook 'bio-based' harsen. Dat samen levert een bio-composiet: licht van gewicht, en geheel gemaakt op basis van natuurlijke bronnen. Met zo'n materiaal in zijn auto geeft Mr. Bond ook de fossiele industrie het nakijken.

Productvormen

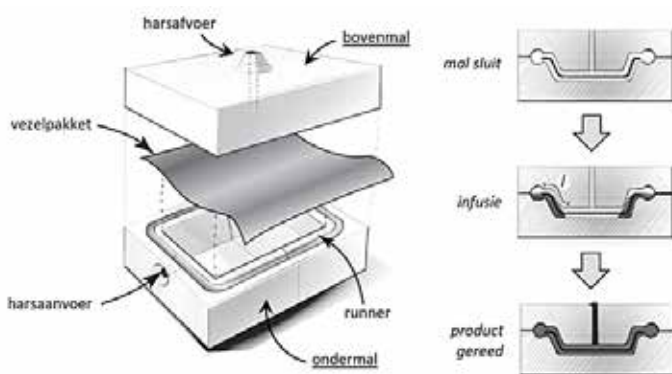
Qua productvormen leent harsinfusie zich allereerst voor dunwandige schaaldelen, zoals de carrosserie van de getoonde Lotus. Door schuimkernen toe te



Zou James Bond zelf hebben geweten hoe innovatief de lichtgewicht constructie van zijn Lotus Esprit nu eigenlijk was in 'The Spy Who Loved Me' uit 1977? (Foto: Lotus)



Dat revolutionaire proces dat voor de Lotus Esprit werd toegepast heet 'vacuum assisted resin infusion', kortweg VARI. (Foto: Lotus)



Afbeelding 3 Het basisprincipe van harsinfusie.

passen, creëert u een sandwichmateriaal – extra stijf en sterk. En als u grote krachten wilt kunnen inleiden in zo'n onderdeel, dan kunt u metalen inzetstukken ('inserts') integreren in het composiet. Weer een andere optie is om de vezels niet als mat, maar als een driedimensionaal vlechtwerk vorm te geven: met dergelijke 'braids' kunt u dan compacte, dikkere onderdelen maken. Qua productgrootte tenslotte leent harsinfusie zich voor formaten van pakweg 10 cm tot vele tientallen meters – windturbinebladen zijn een voorbeeld van dit laatste.

Basisprincipe

Het basisprincipe van harsinfusie werkt als volgt. Eerst snijdt u de vezels op maat, als matten of vlechtwerk, en plaatst ze netjes in een specifiek voor uw product gemaakte mal. Eventuele schuimkernen en andere inzetstukken zet u ook op hun plek. Daarna sluit u de mal en koppelt u een aanvoer en een afvoer voor de hars aan: de infusie kan beginnen.

Vaak wordt de hars hierbij gemengd met een 'harder': een chemisch actieve stof die ervoor zorgt dat de vloeibare hars uit kan gaan harden. Uiteraard moet de mal geheel gevuld zijn voordat dit uitharden echt op gang komt – in de praktijk is dit een mooi probleem om te optimaliseren. Na het uitharden maakt u de mal open, haalt het product eruit en werkt het af, en tenslotte maakt u ook de mal weer goed schoon. Nu kan de cyclus zich herhalen. Afbeelding 3 illustreert dit algemene principe. Vergeleken met spuitgieten en thermovormen is harsinfusie traag. De infusie zelf duurt vaak vele minuten, uitharden al snel een uur of nog langer. Maar, omdat de drukken laag zijn, is er geen noodzaak om zware (en dus dure) mallen te maken. Wat dit laatste aangaat zijn er echter wel belangrijke verschillen tussen de diverse methoden, zoals de volgende sectie laat zien.

Mallen en methoden

In de basis kunt u met harsinfusie twee verschillende kanten op: de hars wordt ofwel met onderdruk de mal ingezogen, of wordt er met overdruk in ge-

Afbeelding 4
Vacuüm-infusie
van een 55-voet
zeilbootromp (CLC
TNO-TUD).



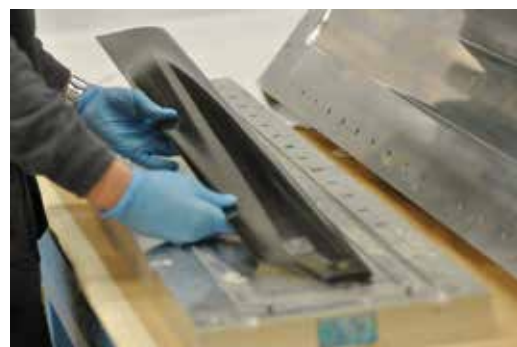
perst. De eerste route heeft als voordeel dat één van de malhelften kan worden vervangen door een vacuümzak – vandaar de Engelse term 'vacuum bagging' voor dit proces. Bovendien wordt de sluitkracht nu geleverd door de buitenluchtdruk. Voor grote producten, zoals windturbinebladen en scheepsrompen, geeft dit laatste voordeel vaak de doorslag. Afbeelding 4 toont dit vacuüm-infusieproces voor een boot, ergens halverwege de infusie. Een nadeel is natuurlijk wel dat slechts één kant van ons product een strak oppervlak krijgt, maar gelukkig is dat voor veel producten geen probleem. Wel is er meer afval, zoals de vacuümzak zelf, die vol harsresten komt te zitten en die we helaas niet kunnen hergebruiken. Tenslotte hebt u maximaal maar één bar drukverschil voor de infusie. Dat kan nadelig zijn; het waarom volgt.

Tweede route

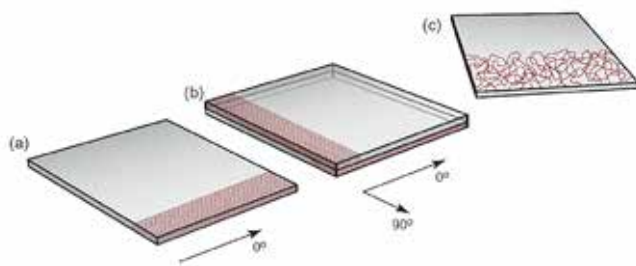
Bij de tweede route hebt u in de praktijk tussen de 5 en 50 bar overdruk tot uw beschikking!. Op zich een voordeel, maar nu zijn er wel twee harde malhelften nodig. Deze moeten bovendien flink stijf zijn om de druk te weerstaan, en kunnen dus zwaar en duur uitvallen. Maar, je krijgt er een tweezijdig 'strak' product voor terug: ideaal voor aerodynamisch producten, zoals rotorbladen (afbeelding 5). Ook is er minder afval. Een gangbare Engelse >

1 Vijf bar is de maximale druk van de meest gangbare persluchtsystemen. Het kunnen gebruiken van standaard oplossingen is vrijwel altijd een groot voordeel.

Afbeelding 5
'Resin transfer
moulding' van een
rotorblad (KVE
Composites B.V.)



SAMPLE



Afbeelding 6 UD (a), cross ply (b) en random oriëntaties (c)

naam voor deze methode is 'resin transfer moulding' (RTM).

Tussenweg

Als tussenweg kunt u ook overdruk (op de harsaanvoer) en onderdruk (op de harsafvoer) combineren, wat dan in het Engels 'vacuum assisted RTM' heet. Nog een variant is 'light RTM': hierbij blijft de druk laag genoeg om een dunne schaal als bovenmal te gebruiken. Zo behoudt u de goede tweezijdige oppervlaktekwaliteit die veel producten vereisen. BMW past voor de i3 (en inmiddels tal van andere toepassingen) nog weer een speciale variant toe: harsinfusie plus mechanische druk.

Materialen: de mengselwet

Bij harsinfusie ontstaat niet alleen een vorm, maar ook een materiaal – en daarmee ook de eigenschappen van dat materiaal. Hieronder laten we zien wat dit betekent voor dichtheid, stijfheid, en sterkte van het resultaat.

Eenmaal uitgehard heeft hars een dichtheid van omstreeks $1,2 \text{ kg/dm}^3$. In de formule die gaat komen, korten we dit af tot HD . Glasvezels zitten op 2,6 en koolstofvezels op 1,8, en dat schrijven we als VD . Van groot belang is nu het volumepercentage van ons materiaal dat door vezels wordt opgevuld, afgekort als $VV\%$, en dat van de hars, $HV\%$. De dichtheid van een composietmateriaal CD is dan als volgt:

$$CD = VV\% \cdot VD + HV\% \cdot HD$$

Met deze 'mengselwet' vinden we voor een glasvezelcomposiet met 50 procent vezels een dichtheid van $1,9 \text{ kg/dm}^3$; een koolstofcomposiet met 60 procent vezels komt op $1,6 \text{ kg/dm}^3$.

Stijfheid

Qua stijfheid zitten harsen tussen 2,0-4,0 GPa. Vezels zijn veel stijver: glas haalt zo'n 80 GPa, en koolstof² zelfs 250. Maar let op: dit geldt alleen in de vezelrichting. We moeten dus niet alleen weten welk volume door vezels wordt ingenomen, maar ook welke kant ze op liggen. Enkele gangbare oriëntaties ziet u in afbeelding 6. In een 'uni-directioneel' (UD) composiet komt u voor de stijfheid van glas-polyester met $VV = 50\%$ uit op 40 GPa – in de richting van de vezels. Dwars daarop haalt dit

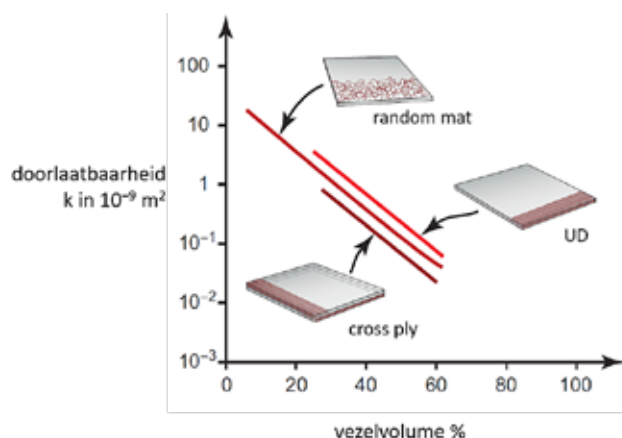
materiaal nog geen 10 GPa. Het is dus anisotroop, net als hout: dat is langs de nerf ook veel stijver dan dwars daarop. In een 'cross ply' ligt een deel van de vezels in de ene richting en de rest in de richting loodrecht daarop. Stel dat dit 50-50 verdeeld is, en dat we weer $VV = 60\%$ hebben, dan komen we voor koolstof-epoxy uit op een stijfheid van 75 GPa – in de beide vezelrichtingen, wel te verstaan; op afschuiving ($+45^\circ$) is de stijfheid weer drastisch minder.

En het wordt nog complexer, want de manier waarop de vezels zijn geweven heeft ook nog invloed. Liggen alle vezels strak en plat, dan zijn ze het stijfst, maar dan zijn ze ook het moeilijkst in de mal te krijgen. Buigen gaat, maar het maken van een dubbelgekromde vorm is nu zeer lastig. Een losser geweven mat biedt meer vormvrijheid – alleen, wel ten koste van de stijfheid. Wordt zo'n composiet op trek belast, dan worden de vezels namelijk eerst rechtgetrokken voordat ze belasting gaan dragen, en dit wordt alleen tegengewerkt door de relatief flexibele hars. Gebruik de mengselwet dus met zorg! Ook optisch heeft dit weefpatroon overigens gevolgen: zo komt het voor composieten zo kenmerkende blokjes-patroon voort uit hoe de vezelmat is geweven.

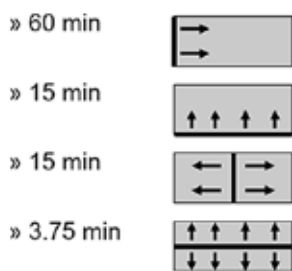
Sterkte

Dan de sterkte. Met treksterktes tussen de 30-50 MPa zijn harsen relatief zwak, maar glas- en koolstofvezels zijn enorm sterk: die halen wel 4.000 MPa of meer. Zou u nu de mengselwet gebruiken, dan komt u op watertandend hoge sterktes voor een composiet – alleen, in de praktijk zien we dat helaas zelden terug. Dit komt doordat de maximale rek van een composiet beduidend minder is dan die van de individuele materialen. Bij glas-polyester is 0,5 procent een redelijk maximum. Het gedrag is wel lineair, dus we kunnen de Wet van Hooke gebruiken. Voor dat UD glas-polyester komen we dan op $40 \text{ GPa} \times 0,5\%$ is 200 MPa – opnieuw, alleen in de vezelrichting. Bij koolstof-epoxy is de maximale rek vaak maar 0,2 procent en dan is de bijbeho-

2 We bedoelen hier de gangbare "high strength" koolstofvezels. De zeldzamere (en duurder) grafietvezels komen makkelijker op 700 GPa. Echter, deze worden zelden met het relatief simpele harsinfusie verwerkt.



Afbeelding 7 De doorlaatbaarheid k als functie van vezelvolumen en -oriëntatie



Afbeelding 8 Infusie-keuzes en hun effect

rende sterkte 75 GPa x 0,2% is 150 MPa. Geen duizenden MPa dus, maar honderden.

Op zichzelf lijken deze stijfheden en sterktes niet bijzonder, maar vergeet u de lage dichtheden niet. Zeker in onderdelen die op buiging, knik of torsie worden belast, kunt u met het relatief goedkope glasvezel-polyester flink wat kilo's sparen ten opzichte van staal, en het duurdere koolstof-epoxy verslaat ook aluminium met gemak.

Infusie: de Wet van Darcy

Qua materiaaleigenschappen hebben composieten dus potentie genoeg. Harsinfusie maakt hun vormgeving mogelijk, maar hoe zit dat nou met die druk? Het antwoord vinden we via de Wet van Darcy. Deze vertelt ons wat de snelheid v is van de hars die door een pakket vezels stroomt³:

$$v = \Delta p \cdot k / \mu \cdot L$$

Hierin is Δp het drukverschil tussen aan- en afvoer van de hars, k de doorlaatbaarheid van het vezelpakket, μ de viscositeit van de hars, en L de lengte die de hars heeft gestroomd. Een voorbeeld zal ons helpen. Stel dat de epoxyhars voor ons eerdere koolstofcomposiet bij infusie een viscositeit heeft van $\mu = 0,15$ Pa·s (spreek uit: 'Pascal-seconde'), dat we met 0,9 bar onderdruk werken ($\Delta p = 0,09$ MPa) en dat de maximale lengte gelijk is aan $L = 1$ m. De doorlaatbaarheid k vinden we uit afbeelding 8 en ligt, voor een 'cross ply' met $V_f = 60\%$, rond de $0,015 \cdot 10^{-9}$ m². We komen op $v = 0,009$ mm/sec. Zouden we deze zeer lage snelheid constant houden over de gehele lengte, dan duurt de infusie bijna 31 uur! Veel te lang dus.

We kunnen uiteraard de druk verhogen. Met de vijf bar van een standaard persluchtstelsel komen we op 5,6 uur, maar dat is nog steeds te lang. Los daarvan hebben we nu twee harde malhelften nodig in plaats van één plus een vacuümsak. Meer druk dus maar? Liever niet, want de mallen worden dan duurder, om over het sluitmechanisme maar te zwijgen. Kan die doorlaatbaarheid niet wat omhoog? Jazeker, zoals afbeelding 7 laat zien – maar dat vraagt een lager vezelvolumepercentage, wat ten koste gaat van de stijfheid en sterkte. Dat is vast niet de bedoeling! En ook in de viscositeit hoeven

we het niet te zoeken: de waarde van 0,15 Pa·s is voor een hars al vrij laag.

Wat overblijft is het minimaliseren van de lengte die de hars moet afleggen. Dit werkt zelfs extra goed: de snelheid neemt toe én de lengte neemt af: de infusietijd schaalt dus met L^2 . We kunnen L omhoog krijgen door niet van de ene kant naar de andere te injecteren, maar vanuit de rand naar het midden. Dit kan middels een kanaal om ons product heen – een 'runner' genaamd – van waaruit de hars door het vezelpakket naar een centraal afzuigpunt gaat⁴. Afbeelding 3 toonde ons deze optie al. Snel, slim, en goedkoop: de rand van ons product moeten we toch al afwerken. In de runner zelf is nauwelijks weerstand, dus die schiet zo vol, en vandaar de naam. Afbeelding 8 laat nog enkele andere opties zien, plus het effect op de infusietijd.

Bij grote producten wordt vaak een netwerk van infusiekanalen toegepast. De runners liggen dan niet *om* maar *in* ons product. Afbeelding 4 toonde dat al, met één centrale hoofdrunner en meerdere zijrunners, als de nerven van een blad. Composiet-ingenieur Kaspar Snijder deed voor de baanfiets van Theo Bos uit 2006 iets soortgelijks, met runners in de schuimkern van het frame. Zo creëerde hij met bescheiden druk een zeer hoog vezelvolumen, en dito prestaties, de berijder waardig. BMW lost het weer anders op: zij injecteren een bubbel hars met de mallen licht geopend, en persen dan met brute kracht de mallen dicht. Dit 'press-assisted RTM' omzeilt de Wet van Darcy en maakt van harsinfusie een snel proces – maar ja, de investeringen passen bepaald niet in ieders budget.

Tot slot nog dit: betrouwbare data voor die doorlaatbaarheid k zijn moeilijk te vinden. Kleine variaties in vezelvolumepercentage (door vervorming van de vezelmat en/of mal, maattoleranties, thermische expansie, etc.), hebben grote gevolgen: afbeelding 7 heeft verticaal een logaritmische schaal! De Wet van Darcy mag dan inzichtelijk zijn voor het principe, maar is weinig geschikt voor simulaties.

Bronnen voor verdere informatie

Leest u nog eens terug, dan zal u opvallen dat er bij harsinfusie aardig wat te ontwerpen is: de vorm, het materiaal, de mal, en zelfs de strategie voor de infusie. Werk genoeg dus, en dan hebben we ons nog ingehouden qua details en varianten. Maar gelukkig is er aan nadere informatie geen gebrek.

Over harsinfusie is veel online te vinden, ook op YouTube: BMW laat hier met trots van alles zien over de productie van de i3, al houden ze hun echte geheimen natuurlijk buiten beeld. Wie meer wil weten kan zich daarnaast verdiepen in de vakliteratuur en diverse wetenschappelijke tijdschriften, maar dé tip is de JEC, zonder meer de belangrijkste vakbeurs voor het proces en voor composieten in het algemeen: www.jec-world.events. ●

Volgende keer in (Not) Safe For Designers: educatie.

⁴ Let op: de Wet van Darcy geldt alleen voor een stroming door een rechte buis of plaat. Voor een stroming die 'van buiten naar binnen' gaat, moeten we de formule aanpassen. Maar, de sterke afhankelijkheid van de stromingslengte blijft.

³ Oorspronkelijk ontwikkeld door Henri Darcy om grondwaterstroming te modelleren, maar ook prima toepasbaar op harsinfusie. Of op koffie-extractie.