

Bewerken van vezelversterkte kunststoffen* I

W. König; P. Grass; Ch. Wulf en H. Willerscheid

Het verspanen van vezelversterkte kunststoffen (VVK), ook vaak aangeduid met de Engelse benaming fibre reinforced plastics (FRP), verschilt in veel opzichten met het verspanen van metalen. De normale bewerkingstaken zijn meestal omtrekbewerkingen van driedimensionale, ruimtelijk gekromde voorwerpen. Het materiaalgedrag van VVK is niet alleen inhomogeen, maar hangt ook af van de eigenschappen van vezel en matrix afzonderlijk, de oriëntatie van de vezel en de manier van weven van de vezels.

In dit eerste deel komen mechanische technieken als boren en frezen aan de orde. Goede resultaten worden verkregen als hardmetaal of polykristallijn diamant (PCD) gereedschappen met scherpe snijkanten worden gebruikt. In dit artikel worden zowel gereedschapsgeometrieën als verspaningscondities besproken.

Tevens komen aan de orde de belangrijke parameters die op het verspaningsresultaat invloed hebben en indien mogelijk wordt hun invloed ook verklaard.

In het tweede deel zal worden ingegaan op de mogelijkheden van waterstraal- en laserstraal snijden.

Inleiding

Sinds hun introductie in de industrie in de vroege jaren dertig, zijn vezelversterkte kunststoffen geëvolueerd van materialen voor minder belangrijke onderdelen als beschermkappen tot materialen met zeer goede eigenschappen voor primaire constructie-elementen. De hoofdreden voor deze vergroting van het toepassingsgebied was de verbetering van de fysische eigenschappen als vermoeiingssterkte, stijfheid, thermische weerstand en dempingscapaciteit, gecombineerd met een licht gewicht. Ook de vergrote betrouwbaarheid, verkregen door verfijnde ontwerp- en produktiemethoden, hebben tot de grotere toepassing van VVK bijgedragen [1].

Tot nu toe lag de nadruk van het speurwerk bij de ontwikkeling van materialen, maar tegenwoordig wordt meer aandacht besteed aan het industriële produktieproces van produkten van VVK. In de vliegtuig- en scheepsbouw – twee bijna klassieke toepassingsgebieden – is produktie van één of enkele stuks een gewone zaak. In de automobiel-, gereedschaps- en sportartikelenindustrie, waar massaproductie overheerst, is er de noodzaak van volledig geautomatiseerde en economische produktiemethoden. De vervanging

van metalen door kunststoffen met glas-, koolstof- of aramide-vezelversterking, vereist niet alleen andere ontwerpmethodologieën, maar heeft ook invloed op zowel de afzonderlijke produktietechnieken als de gehele woringsgang van de produkten.

Bewerkingstaken voor VVK

VVK verkrijgen hun uiteindelijke vorm door de overgang van de "zachte" naar de "harde" materiaalfase van het matrixmateriaal. Dit is een kenmerkende eigenschap van hun produktie. In het algemeen gebeurt dit door faseverandering of uitharding van het thermoplastische of thermohardende materiaal op of in een vorm. De belangrijkste produktietaken verschuiven daarom van het bewerken van onbewerkt of enigszins voorbereikt materiaal (karakteristiek voor metalen werkstukken) tot het voorbereiden van componenten van voorgeconditioneerde materialen en plastische vormgeving van nog niet uitgeharde VVK. De enige bewerkingstaken in deze fase van de produktie is het snijden van de droge vezelmatten of "prepregs".

[1] Zie voor ontwerpberekeningen bv het dictaat: Nijhof, Ontwerpen in Vezelversterkte Kunststoffen, collegedictaat Technische Hogeschool Delft afd. Werktuigbouw

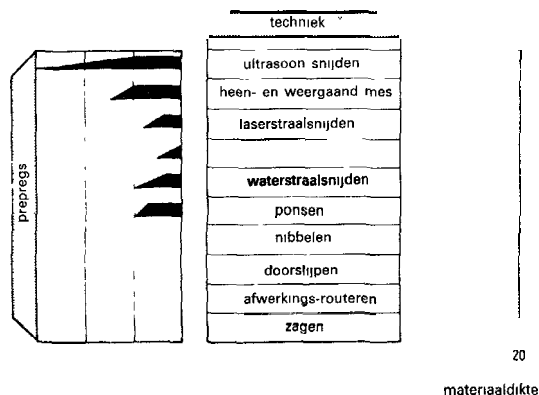
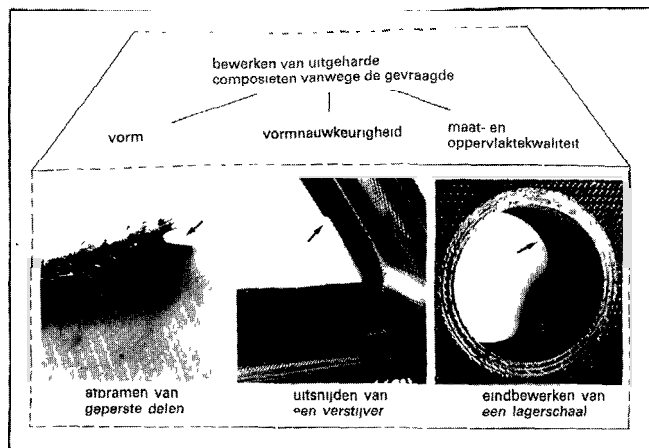
Ondanks deze "near-net-shape" produktie, zal toch vaak een nabewerking van de VVK nodig zijn: de vereiste maatnauwkeurigheid, oppervlaktekwaliteit of materiaalhomogeniteit – speciaal in de randdelen – zullen niet altijd met redelijke inspanning in de uithardingsfase bereikt kunnen worden. Er zijn daarom drie verschillende nabewerkingscategorieën, die verschillen ten aanzien van de eisen gesteld aan vorm- en maatnauwkeurigheid en oppervlaktekwaliteit (figuur 1). Eenvoudige nabewerkingen, als het afbramen van geperste produkten, worden toegepast voor oppervlakken zonder belangrijke mechanische functies. De gevraagde nauwkeurigheid is dan in de orde van 0,1 tot 1 mm. De grotere nauwkeurigheid – kleiner dan 0,1 mm – is vereist voor het bewerken van oppervlakken die moeten passen aan andere delen, zonder daarbij krachten door te leiden. Typische voorbeelden daarvan zijn het knippen en het boren van doorlopende gaten. Als het oppervlak krachten moet doorleiden, zoals het geval is bij lageringen, zittingen, passingen en gaten voor klinknagels, worden extra eisen afhankelijk van de functie gesteld aan de oppervlaktenauwkeurigheid.

Bewerkingstechnieken voor VVK

Ten behoeve van de bewerking van VVK zijn technieken ontwikkeld – afgeleid van technieken uit de textielindustrie – voor het maken van de zogenaamde "prepregs". Evenzo zijn van de hout- en metaalbewerking technieken afgeleid voor het bewerken van uitgeharde laminaten (figuur 2). Het bewerken van de "prepregs" bestaat meestal uit het in het platte vlak knippen van een dun werkstuk. Dunne uitgeharde laminaten kunnen op dezelfde manier geknipt worden, zelfs als zij ruimtelijk gekromd zijn.

Voor de gemakkelijk te knippen, slappe "prepregs" worden ook speciale knippen materiaalverwijderingstechnieken gebruikt. Behalve de soort vezel, is het aantal lagen dat gesneden moet worden het hoofdcriterium voor de keuze van de snijtechniek. Met op-en-neer bewegende messen, vooral die met ultrasone aansturing, kunnen de meeste bewerkingen uitgevoerd worden.

* Vertaling/bewerking van het artikel "Machining of Reinforced Materials", gepubliceerd in Annals of the CIRP 1985



Figuur 1 Bewerkingstaken voor VVK

Met deze techniek kunnen tot 30 prepregs en ingewikkelde patronen met kleine radii gesneden worden, met hoge kwaliteit en grote voedingsnelheden. De slechte thermische stabiliteit van de "prepregs" vereist een voldoende grote voedingsnelheid en een goed ontwerp van het mes om wrijving en dus overmatige verhitting van het materiaal te voorkomen. Soortgelijke thermische problemen treden op bij het snijden met een laserstraal van meerdere "prepregs", met lage voedingsnelheden. Chemische beïnvloeding kan bij waterstraalsnijden optreden, als het oppervlak vochtig wordt omdat de straalmond op een (grote) afstand van het werkstuk staat.

Sommige van de genoemde technieken zijn ook voor dunne uitgeharde lamina's toepasbaar. Bij dikker materiaal moet toevlucht worden gezocht tot technieken uit de metaalbewerking. Zagen en doorslijpen zijn geschikt voor rechte sneden, maar minder voor ruimtelijk gekromde sneden. Dezelfde restricties gelden voor ponsen en nibbelen, die alleen op platte vlakken toegepast kunnen worden. Daarom zullen in het navolgende alleen de universele technieken frezen, laser- en waterstraalsnijden en het veel voorkomende boren worden besproken.

Fysische eigenschappen van VVK

In sommige opzichten verschilt het bewerken van VVK aanzienlijk met dat van metalen. VVK zijn uit zichzelf niet-homogeen en in elk geval in een laag anisotroop. VVK bestaan uit een dragende vezelcomponent, meestal een bundel parallelle vezels of bundels. Dit vezelskelet heeft een geometrische orientatie die aangepast moet zijn aan de belasting en is omgeven door een matrix van thermohardend of thermoplastisch materiaal. De matrix dient voor-

namelijk voor fixatie van de vezels en het verdelen van de belasting. De fysische eigenschappen van matrix en vezels zijn verschillend; samen met de vezeloriëntatie bepalen zij de eigenschappen van het uiteindelijke composietmateriaal, zowel in gebruik als tijdens de bewerking.

De invloed van het vezelmateriaal is hierin overheersend. Figuur 3 geeft een overzicht van de belangrijkste eigenschappen van de meest algemene vezeltypen en hun bezwijkmechanismen. De neiging tot brosse breuk van de anorganische glas- en koolstofvezels in tegenstelling tot de taaie organische aramidevezel is duidelijk zichtbaar. Aramidevezels kunnen gemakkelijk worden gespleten vanwege de lage cohesiekrachten in de aramidemoleculen. De glasvezel, isotroop vanwege zijn amorfe structuur, en de koolstofvezel, bestaande uit in elkaar gedraaide grafietdraden, hebben in tegenstelling tot aramide geen glijmechanisme, vergelijkbaar met het glijden van de rooster-vlakken over elkaar bij metalen. Aramidevezel heeft dit mechanisme wel. Daarom kan een aramidevezel een buigbelasting weerstaan, terwijl een koolstofvezel reeds bij een relatief lage buigbelasting zonder plastische deformatie breekt.

Voor de thermische bewerkingsmethoden zijn (uiteraard) de thermische eigenschappen van de vezel van het grootste belang. Glas- en aramidevezels, allebei slechte warmtegeleiders, smelten bij respectievelijk 1300°C en 550°C. Koolstofvezel is een goede warmtegeleider, ontleedt bij afwezigheid van lucht bij 3600°C. Het is interessant op te merken dat glasvezels een positieve uitzettingscoëfficiënt hebben in zowel transversale als longitudinale richting, terwijl koolstof en aramidevezels transversaal uitzetten en longitudinaal krimpen.

De meeste van de matrixmaterialen, waarvan de eigenschappen in figuur 4 staan vermeld, hebben alle een ongeveer gelijke rekgrens en elasticiteitsmodulus, die beide veel kleiner zijn dan die van de vezels. De thermoplastische materialen PA (polyamide) en PEEK (polyether-etherketon), hebben een hoge breukrek en een thermische uitzettingscoëfficiënt die opvallend veel groter is dan die van de vezelmateriaal.

Deze eigenschappen leiden tot enige specifieke problemen van het bewerken van VVK. Aan de hand hiervan kunnen we typische klassen van materiaalbeschadiging onderscheiden (zie figuur 5):

- Lokale dynamische belastingen, vooral buigbelastingen, kunnen leiden tot delaminatie. Deze belastingdelaminatie zal vooral bij aramide- en glasvezel optreden vanwege de verschillende stijfheden van vezel en matrix. Thermische delaminatie kan optreden als de uitzettingcoëfficiënten van beide componenten verschillen.
- De vezels in de toplagen van koolstofversterkte materialen, die niet door ander materiaal gesteund worden, hebben de neiging naar "buiten te splinteren" vanwege de lage buigsterkte van de vezels. Onder dezelfde omstandigheden zullen uit met glasvezel versterkt materiaal kleine stukjes van randen uitbrokkelen. De glasvezel kan de belasting dan nog wel verdragen, maar de matrix niet meer. Beide problemen treden vooral op aan de onderzijde van het werkstuk omdat daar het gereedschap uit-treedt.
- Aramidevezels bezwijken, in tegenstelling tot de andere soorten vezels, alleen tengevolge van trekspanningen en desintegreren bij buigbelastingen. Er ontstaat een karakteristiek beeld van uitgetrokken en gebroken vezels, ook wel rafelen genoemd

	E-glas	koolstof HT	aramide
dichtheid (g/cm ³)	2,5	1,75	1,45
smelt- of ontbindingstemperatuur (°C)	1300	3600	550
thermische geleidbaarheid (W/mK)	0,8	15-100	0,13
thermische uitzettingscoëfficiënt (10 ⁻⁶ m/mK)	5	-0,5	-2
treksterkte (N/mm ²)	1800	2800	2700
longitudinale elasticiteitsmodulus (N/mm ²)	74000	235000	133000
transversale elast modulus (N/mm ²)	74000	17000	7000
brekrek (%)	2,5	1,2	2,5
specifieke afschuifsterkte	0,4	--	0,55
specifieke sterkte	0,15	--	0,38
bezwijkingsmechanisme	brus	brus	tear

glasvezel
koolstofvezel
aramidevezel

figuur 3 Bezwijkmechanisme en fysische eigenschappen van vezels

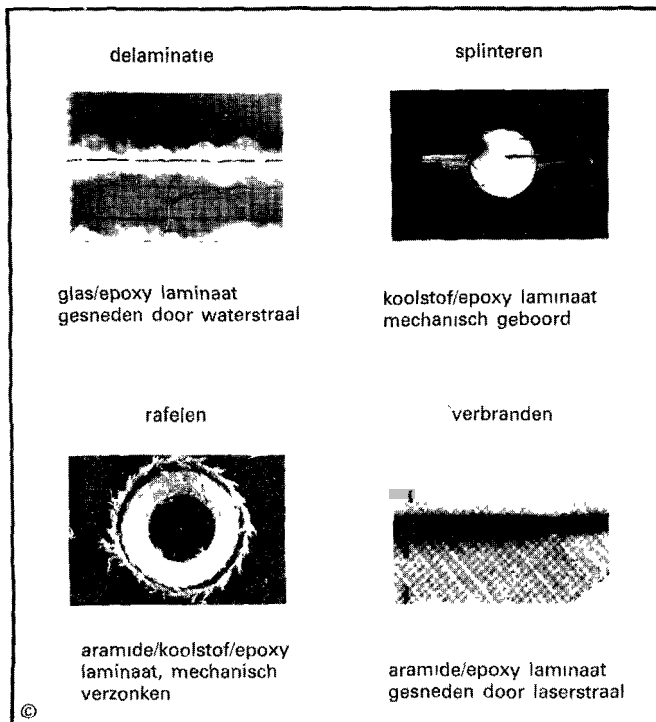
Ondanks de hoge temperatuursbestendigheid van de vezels is de maximale temperatuur beperkt tot de smelt- of ontbindingstemperatuur van het matrixmateriaal. Er kan verbranden optreden; dit wordt versterkt door de slechte temperatuursgeleiding van vezels en matrix. VVK kunnen daarom alleen met een thermisch proces met hoge vermogensdichtheid en een korte interactietijd

gesneden worden (b.v. lasersnijden). Koolstofvezels zijn niet geschikt voor thermisch snijden. Procesparameters die niet zorgvuldig zijn afgestemd op het verspanen van VVK, kunnen tevens leiden tot zware beschadiging van de gereedschappen. Glas- en koolstofvezels, van nature sterk abrasief, kunnen een voortijdige afronding van de snijkanten veroorzaken. De verschillende hardheden van

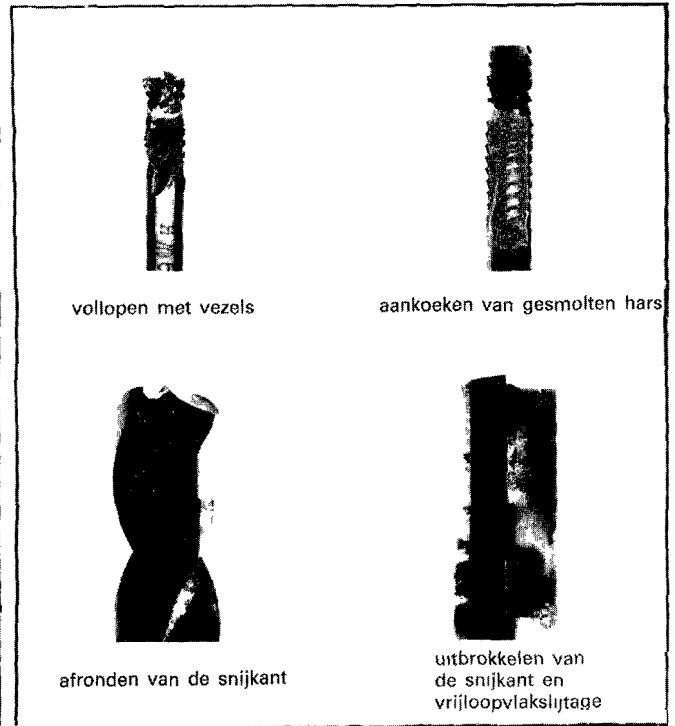
vezel en matrix, in combinatie met de hoge snijweerstand van de vezels, veroorzaken uitbrokkelen van de snijkant. Aramidevezels hebben, als ze uitgetrokken en gestrekt worden, de neiging aan het gereedschap te blijven kleven en er omheen te krullen. Als ten gevolge van grote wrijving de matrix gesmolten is, blijft deze aan het gereedschap plakken en gaat klonten. Gesmolten hars en vezelspaanders zullen de spaanruimten vrijwel direct vullen (zie figuur 6).

Figuur 4 Fysische eigenschappen van matrix materialen

	onverzadigde polyester	epoxy	fenolformaldehyde	polyamide	polyetheretherketon
volumieke massa g/cm ³	1,2	1,2	1,3	1,1	1,3
thermische geleidbaarheid W/mK	0,6	0,23	0,32	0,27	--
thermische uitzettingscoëfficiënt	60-80	65	15-30	70-100	--
treksterkte N/mm ²	40-60	80-90	40-60	65-80	80-100
elasticiteitsmodulus N/mm ²	3500	3500	3000	2800	3800
brekrek %	2-3	4-5	1,5-2	10-50	100-150
kerfslagwaarde KJ/m ²	1	1,5	--	6	50



Figuur 5 Karakteristieke materiaalschade door bewerkingen



Figuur 6 Faalverschijnselen bij verspaningsgereedschappen voor VVK

Kwaliteitsstandaarden voor het bewerken van VVK

Uitgeharde laminaten hoeven meestal alleen nog eindbewerkingen te ondergaan; de verkregen kwaliteit is dus van belang. Bij de bewerking van VVK moet de betekenis van het begrip "kwaliteit" in vergelijking tot de gangbare inhoud van dat begrip in de metaalbewerking worden bekeken. De voorgaande voorbeelden van materiaalbeschadiging veroorzaakt door het bewerkingsproces dwingen af dat behalve een evaluatie van de vorm en ruwheid van het oppervlak, tevens een beschrijving van de materiaalbeïnvloeding door het proces nodig is. De beoordeling van deze criteria is bij VVK moeilijker dan bij metalen, vanwege de inhomogene structuur van de kunststoffen. Op dit moment bestaan er geen algemeen geaccepteerde standaarden voor meettechnieken en beoordelingscriteria. De beoordeling van het verspaningsresultaat gebeurt nu vaak door visuele inspectie.

Om het verspaningsresultaat ten aanzien van de oppervlaktekwaliteit en de materiaalbeschadiging goed te kunnen beschrijven, zullen in het volgende twee meetwaarden worden gebruikt:

- de gemiddelde ruwheidshoogte R_z , gemeten door een tasterinstrument;
- de breedte van de beschadigde zone b_a , dit is het maximale gebied loodrecht op het snijvlak waarin schade als delaminatie, versplintering of verbranding waargenomen kan worden.

Bij de interpretatie van deze meetwaarden moet een aantal belangrijke zaken in het oog worden gehouden:

Het meten van ruwheden van VVK is minder betrouwbaar dan bij metalen, omdat uitstekende vezels aanleiding geven tot foutieve uitkomsten of in elk geval een grote spreiding in die uitkomsten veroorzaken. Extra fouten worden bovendien veroorzaakt door vezels die aan de taster blijven haken. Alleen glas- en koolstofversterkte materialen zijn daarom geschikt voor ruwheidsmetingen, niet de vezelige aramidecomposieten; in dat geval kan een indirecte ruwheidsmeting via een replica uitkomst bieden. De gemeten ruwheidswaarden zijn voor een groot deel afhankelijk van de door de taster gevolgde weg ten opzichte van de vezelrichting. Omdat de vezelrichting per laag kan verschillen, moet of de door de taster gevolgde weg in één laag of in een aantal lagen liggen en moet een gemiddelde over diverse metingen worden genomen. Ook dan nog is een enkelvoudige ruwheidswaarde als ruwheidshoogte (R_z) minder geschikt dan een integrale ruwheids-

waarde als b.v. de tienpuntsruwheid R_z , die immers de gemiddelde hoogte van de vijf hoogste toppen ten opzichte van de vijf diepste dalen binnen het meettraject aangeeft.

Het onderzoeken van materiaaldefecten met een microscoop brengt de onzekerheid met zich mee of wel alle defecten - vooral die onder het materiaaloppervlak - waargenomen zijn. Hierbij komt dat de beschadigingen zich eerst manifesteren als kleine geïsoleerde delaminatiezones, in plaats van delaminatie van grotere gebieden, wat karakteristiek is voor een hoge mate van beschadiging. Uit puur mechanisch oogpunt lijkt een integrale waarde, waarin het beschadigd oppervlak of een gemiddelde breedte van die zone als maatstaf wordt genomen, een betere beschrijving van de beschadigingstoestand. Op dit moment zijn er niet voldoende gegevens voorhanden over de sterkte van beschadigde VVK, van waaruit besloten kan worden of de maximum beschadiging, de gemiddelde schade of de afmeting en vorm van de schadezone gemeten moeten worden. Omdat in veel gevallen de zichtbaarheid van eventuele schade niet zo belangrijk is als de negatieve invloed op de eigenschappen, is in het volgende de maximum breedte van de beschadigde zone als criterium gekozen.

Al deze moeilijkheden ten aanzien van de kwaliteitsbeschrijving en -meting, maakten het noodzakelijk voor de tests VVK te gebruiken met een bekende en constante samenstelling. De metingen moesten telkens op dezelfde wijze en met dezelfde instrumenten plaatsvinden. Er zijn daarom (hoewel verkrijgbaar) geen andere verspaningsgegevens gebruikt voor het vergelijken van verspaningstechnieken. Er zijn veel schrijvers die verspaningsgegevens van VVK hebben gepubliceerd, maar omdat in veel gevallen de materiaalsamenstelling en de meetmethoden niet volledig beschreven waren, zijn ze niet bruikbaar als vergelijkingsmateriaal. De navolgende resultaten bieden een algemeen overzicht van het stelsel problemen en - zover mogelijk - van de huidige verklaringen van de optredende verschijnselen.

Het verspanen van VVK

Het verspanen van VVK stelt speciale eisen aan de geometrie en abrasieve weerstand van het snijgereedschap [10, 13, 16]. Voor het bewerken van glas- en koolstofvezel-laminaten is snijgereedschap met een conventionele geometrie, als bij staal, geschikt. In sommige gevallen, vooral bij boren, zal een spe-

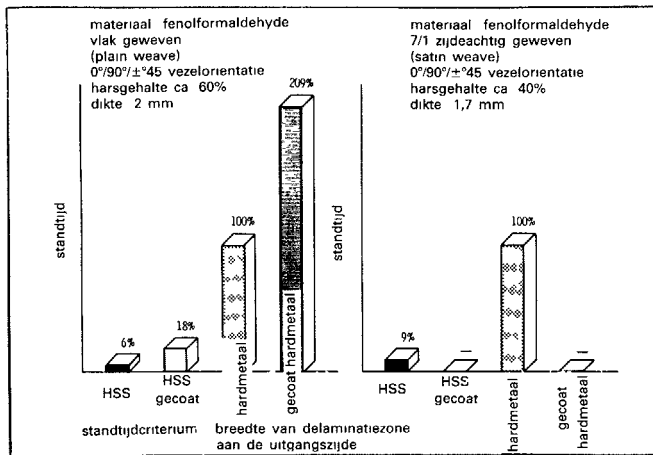
ciale geometrie noodzakelijk zijn. Polykristallijn diamant (PCD) en kubisch boriumnitride (CBN) of zeer fijnkorrelig hardmetaal worden veel gebruikt als snijmateriaal, vanwege hun hoge weerstand tegen schurende slijtage en uitbrokkelen van snijkanten. Om een lange standtijd te verkrijgen worden voor routieren frezen met meer snijkanten zoals de zogenaamde "diamond cut" (zie figuur A) toegepast. Galvanisch gebonden diamantslijpgereedschap wordt ook veel gebruikt [10, 11, 12, 13, 16, 17, 19].

Bij aramide-vezelcomposieten (AFRP) kunnen geen standaard gereedschappen worden toegepast, zonder zware materiaalbeschadiging als delaminatie en rafelen. Het verspanen van aramidevezels vereist scherpe snijkanten en een gereedschapsgeometrie die het verplaatsen van de vezels vóór de snijkant uit belet. Snelstalen (HSS) gereedschappen hebben een lage standtijd, zelfs in zuiver AFRP. Gereedschappen gemaakt uit hardmetaal, voornamelijk van het type K05 - K10 met microkorrelstructuur leveren een veel beter resultaat. De standtijd kan vergroot worden door het coaten van HSS met TiN (figuur 7). In sommige gevallen echter, kan de hierdoor vergrote snijkantsafronding, de bruikbaarheid van het gereedschap volkomen teniet doen. Slijpgereedschappen, die meestal een negatieve spaanhoek hebben, zijn niet geschikt voor het bewerken van AFRP.

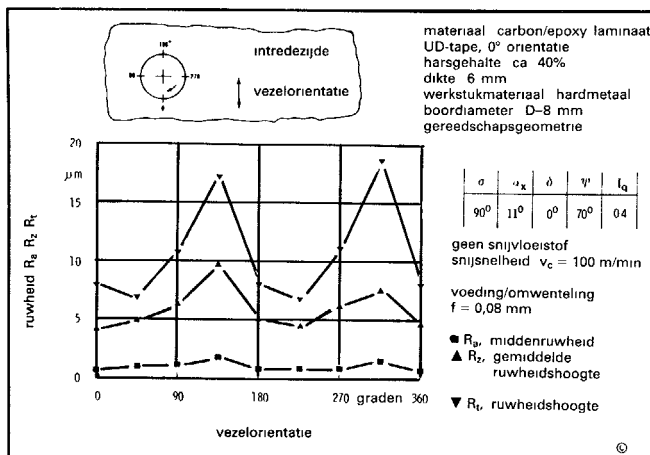
Het wordt nog moeilijker als het composietmateriaal uit een mengsel van aramide- en glas- of koolstofvezels bestaat. Meestal kan dan niet aan alle eisen tegelijkertijd voldaan worden. Omdat de bovenlaag van het materiaal de grootste invloed heeft op het bewerkingsresultaat, moet de keuze van de gereedschapsgeometrie gebaseerd worden op het toplaagmateriaal. Een groot probleem bij het bewerken van VVK is het ontstaan van kleine zwevende stofdeeltjes. Glas- en koolstofvezels geven een fijn stofachtig poeder, bij het bewerken van aramide ontstaat er een soort nevel van korte spaantjes [11, 12, 22]. In elk geval moet het stof opgevangen en gefilterd worden, om gevaar voor de gezondheid en schade aan de gereedschapswerktuigen te voorkomen.

Boren

Het grootste probleem bij het boren is de kwaliteit van de uittreezijde van het gat. De breedte van de beschadigde zone en de oppervlakteruwheid aan die kant zijn daarom de beste graadmeters voor het resultaat. Er moet echter opge-



Figuur 7 Standtijd bij boren van aramide-VVK



Figuur 8 Invloed van vezeloriëntatie op oppervlakeruwheid bij boren van VVK

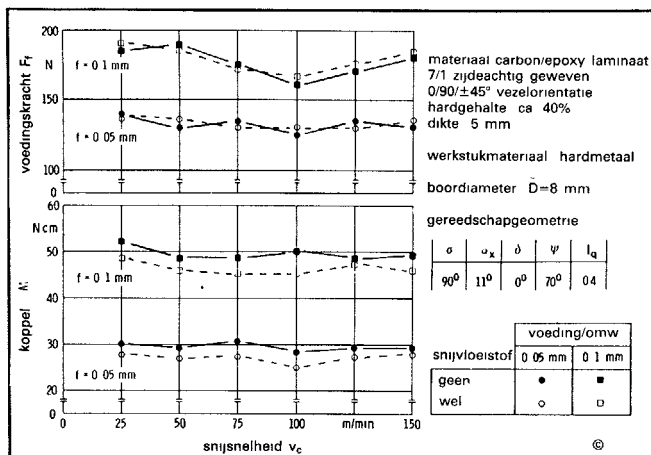
merkt worden dat het gemeten resultaat in sterke mate afhankelijk is van de vezeloriëntatie. Figuur 8 geeft een typisch voorbeeld van de resultaten bij het boren van unidirectionaal (UD, een weefsel waarin de ketting uit ongetwijfelde vezels bestaat en de inslag dun is) koolstofversterkt materiaal. De maximale ruwheid treedt op bij een drukbelasting onder 45° met de vezel, in dit geval dus onder 135° en 315° ten opzichte van langsrichting van de vezels. Bij deze hoeken bereiken ook de tangentiële krachten en dus het verspaningsmoment een maximum. De grootte van dit maximum is uiteraard afhankelijk van de gereedschapsgeometrie en de verspaningsparameters. Omdat een laminaat meestal uit meerdere lagen be-

staat met verschillende oriëntatie en elke vezelinrichting tenminste twee keer per omwenteling doorlopen wordt, moeten het gemiddelde en de standaardafwijking van meerdere ruwheidsmetingen op verschillende plaatsen gebruikt worden om de kwaliteit van het oppervlak te beschrijven.

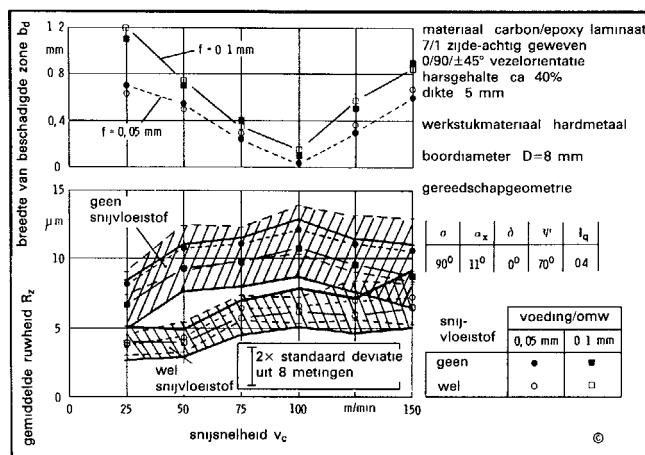
In het algemeen stijgen de snijkrachten bij het bewerken van glas- en koolstofcomposieten duidelijk bij de vergroting van de voeding, terwijl de snijsnelheid bijna geen invloed heeft (figuur 9). De krachten bij het boren van koolstof-HT-composieten (high-tenacity, een taai soort koolstofvezel) zijn meestal groter dan bij het boren van met E-glasvezel-

versterkt materiaal (E-glas, een glassoort oorspronkelijk ontwikkeld voor elektrotechnische doeleinden; deze vezel wordt verreweg het meeste toegepast in VVK), bij vergelijkbare laminaatstructuur. Het gebruik van een koelvloeistof, dat meestal vermeden wordt i.v.m. mogelijke chemische aantasting, beïnvloedt de voedingskracht niet significant en vermindert het verspaningsmoment slechts weinig.

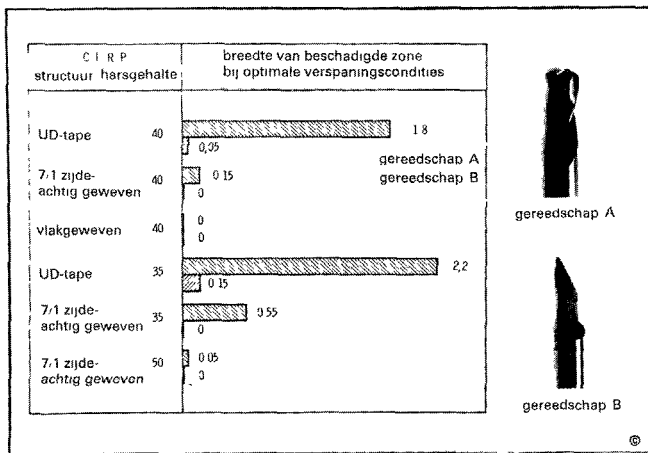
Het effect van het gebruik van een koelvloeistof op de oppervlakeruwheid is duidelijker. De ruwheid, die slechts weinig groter wordt bij een grotere voeding en snijsnelheid, neemt duidelijk af bij gebruik van een koelvloeistof (figuur 10). Omdat niet alleen de gemiddelde



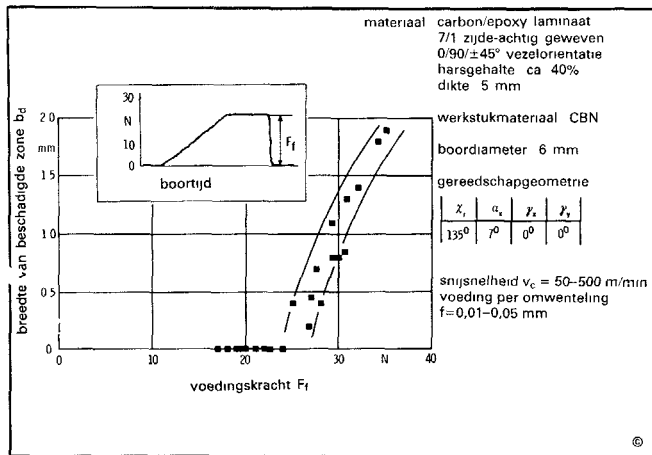
Figuur 9 Invloed van snijsnelheid en koeling op snijkraft bij boren van VVK



Figuur 10 Invloed van snijsnelheid en koeling op beschadiging en oppervlakeruwheid bij boren van VVK



Figuur 11 Invloed van gereedschapsgeometrie op beschadiging bij boren van VVK



Figuur 12 Invloed van voedingskracht op beschadiging bij boren van VVK

ruwheid, maar ook de standaarddeviatie afneemt, wordt een mooier en constanter oppervlak verkregen. Vanwege materiaalbeschadiging afhankelijk van de materiaalstructuur, geeft slechts een klein gebied van snijnsnelheden optimale resultaten.

In figuur 11 wordt een vergelijking gemaakt tussen standaard- en speciale gereedschappen. Op gemakkelijk te bewerken plat geweven (plain weave) glas- of koolstofversterkt materiaal presteert een standaardboor van type A net zo goed als een speciaal ontworpen boor. Composieten met UD-vezellagen of met relatief weinig hars vereisen scherpe, naar voren uitstekende snijkanten aan de omtrek van de boor. Bij boren met dit soort snijkanten bestaat er een bepaalde relatie tussen de grootte van de voedingskracht en de breedte van de beschadigde zone aan de uittreezijde van het gat (figuur 12). Zolang de voedingskracht beneden een bepaalde kritieke waarde blijft, treedt er geen beschadiging op. Boven deze waarde, die ver beneden de voedingskracht van normale standaardboren ligt, treedt er wél beschadiging op, die zich snel uitbreidt. Het is daarom erg aannemelijk dat het verloop van de kracht en niet de piekwaarde ervan een belangrijke rol speelt in het beschadigingsproces. De plotselinge terugval van de belasting bij het uitreden van de speciaal gevormde snijkanten veroorzaakt blijkbaar meer schade dan het geleidelijk minder worden van de snedebreedte bij het doorkomen van een standaardboor.

Een snijkantshoek van $\alpha_r = 45^\circ$ heeft voor standaardboren bewezen het best

te voldoen. Een duidelijke correlatie tussen het verloop van de voedingskracht en de mate van beschadiging, zoals beschreven in [15], kon niet worden gevonden.

Eenlipsboren, speciaal die van PCD of CBN, hebben een opmerkelijk lange standtijd waarin de gatqualiteit constant blijft, maar de gaten zijn sterk onrond vergeleken met boren met twee snijkanten vanwege de niet-symmetrische snijkrachten

Om in aramidevezelversterkt materiaal goed te kunnen boren, moeten de vezels voorgespannen zijn en met een scheerbeweging afgesneden worden. Het is daarvoor noodzakelijk de vezels van de buitenste boorumtrek naar het middelpunt toe te trekken. Dit kan bewerkstelligd worden door boren met aan de randen naar voren uitstekende snijkanten en positieve radiale en axiale spaanhoeken toe te passen. Bovendien moet de snijkantradius ongeveer 8-15 μm zijn om een 'schone snede' en een voldoende stabiele, niet uitbrokkelende snijkant te verkrijgen.

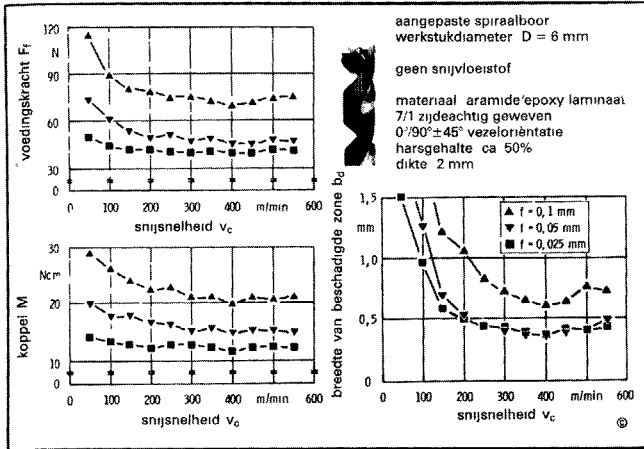
Een vergroting van de snijnsnelheid veroorzaakt een vermindering van de snijkrachten. Boven een bepaalde snelheid blijven de krachten constant (figuur 13). De breedte van de gedelamineerde zone vertoont een soortgelijk gedrag. Het matrixmateriaal mag niet gaan smelten of branden; dit kan vooral bij hoge snijnsnelheden en een kleine voeding gebeuren. In het algemeen geeft een lage voeding een lage voedingskracht en een laag verspanningsmomenten ook minder delaminatie. Bij een voeding van minder dan 0,05 mm/omw worden

de verschillen in materiaalbeschadiging zeer klein. Daarom is een overdachte keus van verspaningsparameters, juist zó dat net geen smelten optreedt, noodzakelijk voor optimale resultaten.

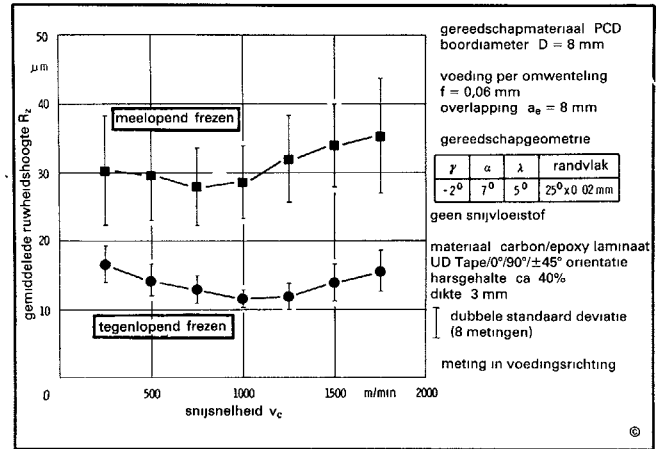
Aramidevezels hebben de neiging zich terug te trekken tijdens het snijproces. De manier van weven en de hechting van het matrixmateriaal aan de vezels speelt een belangrijke rol. Een vergroting van de snijnsnelheid kan tot op zekere hoogte de dislokatie van de vezels onderdrukken. Een laminaat met een zijdeachtig weefsel (satin weave) of een matrix van fenolformaldehydhar moeten dus bij hogere snijnsnelheden bewerkt worden dan één met een plat geweven (plain weave) vezelmateriaal of een epoxy matrix.

Routeren

In de vliegtuigindustrie komt veel voor het uitfrezen van grillig gevormde plaatdelen met een kleine vingervrees, routeuren genaamd. Voor routeuren als afwerking van glas- en koolstofvezelversterkte materialen worden gereedschappen aanbevolen met meerdere snijkanten, gemaakt van hardmetaal of polykristallijne snijmaterialen [11, 12, 13, 16, 17, 20, 22]. Een vergelijking tussen hardmetalen en PCD-gereedschappen wees uit dat PCD-gereedschappen en hardmetalen gereedschappen een ongeveer gelijke snijkrachtafhankelijkheid van de verspaningscondities geven, maar dat hardmetalen gereedschappen na korte tijd versleten waren vanwege de vereiste hoge snijnsnelheden [12]. Daarom wordt de zogenaamde "diamond cut" toegepast; deze is opgebouwd uit een aantal snijkanten (zie figuur A). De snijkanten snijden elkaar een aantal malen



Figuur 13 Invloed van verspaningsparameters op snijkracht en beschadiging bij boren van aramide-VVK

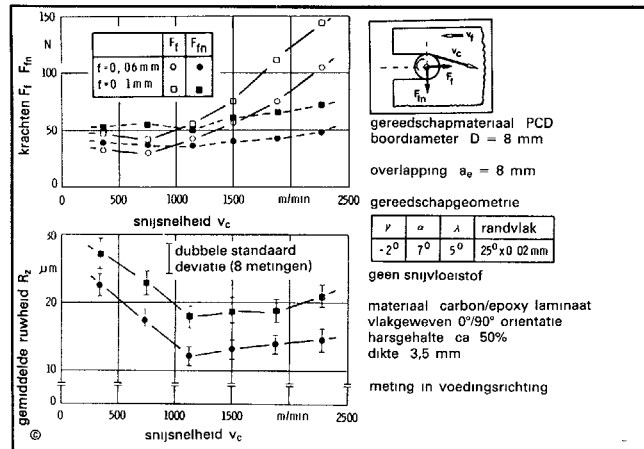


Figuur 14 Invloed van mee- of tegenlopend frezen op oppervlakteruwheid van een koolstoflaminaat

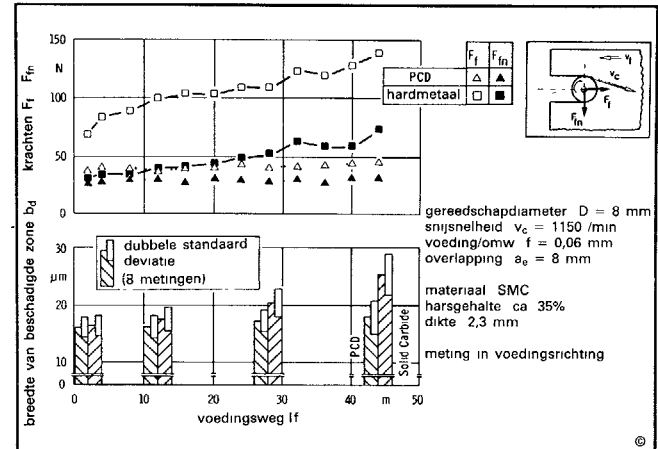
op de omtrek bij dit ontwerp. Galvanisch gebonden diamantslijpstiften hebben de neiging te verstopen met verspaande deeltjes. Dit kan leiden tot vergrote wrijving en daardoor tot smelten of verbranden van het gesneden vlak. Verder leidt het gebruik van grove korrels, die noodzakelijk zijn voor het gleuffrezen ($a_0 / D = 1$), tot een relatief ruw oppervlak [12, 17, 20]. De beste bewerkingskwaliteit bij het trimmen van glas- en koolstofvezelversterkt materiaal wordt verkregen bij meelopend frezen, onafhankelijk van gereedschapsgeometrie en verspaningscondities. Het voorbeeld van figuur 14, een koolstoflaminaat, laat zien dat de gemiddelde ruwheidshoogte en de constantheid daarvan aan de meeloo-freeskant veel lager is dan aan de tegenloopkant.

Net als bij het boren is ook bij routeren de grootte van de snijkracht en de oppervlaktekwaliteit sterk afhankelijk van de vezeloriëntatie. Dit wordt bevestigd door andere bronnen zoals [22]. De grootste krachten en de slechtste kwaliteit treden op bij een drukbelasting onder 45° . De laagste kracht treedt op als de snede evenwijdig aan de vezels loopt, want dan wordt de matrix in plaats van de veel sterkere vezel verspaand. Bij een constante voeding per omwenteling kan t.a.v. de oppervlakteruwheid een optimale snijsnelheid gevonden worden (figuur 15). Naast dit optimum, dat bij verschillende voedingssnelheden en bij verschillende gereedschappen wordt gevonden, stijgt de kracht in de voedingsrichting en wordt de oppervlakteruwheid groter.

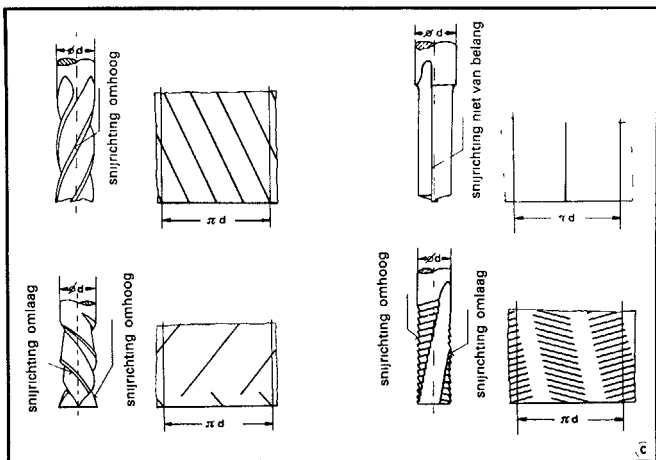
PCD-gereedschappen zijn qua standtijd verreweg superieur aan hardmetalen gereedschappen. Zelfs na een snijweg van meer dan 40 meter was bij het PCD-gereedschap alleen een lichte teruggang in geproduceerde oppervlaktekwaliteit te vinden, terwijl bij het hardmetalen gereedschap een duidelijke vergroting van de snijkracht en afname van de oppervlaktekwaliteit optrad. Behalve een vergroting van de snijkantsafrondering van $r_z = 9 \mu\text{m}$ tot $r_z = 14 \mu\text{m}$ werd geen slijtage van de PCD-snijanten waargenomen, zie figuur 16. Conventionele frezen met een in een richting schroefvormig verlopende snijkant (linksboven in figuur 17) zijn niet geschikt voor het routeren van AFRP [10, 13, 18, 19], omdat er rafelen optreedt. Dit wordt veroorzaakt door axiale snijkrachten in de toplaag, die



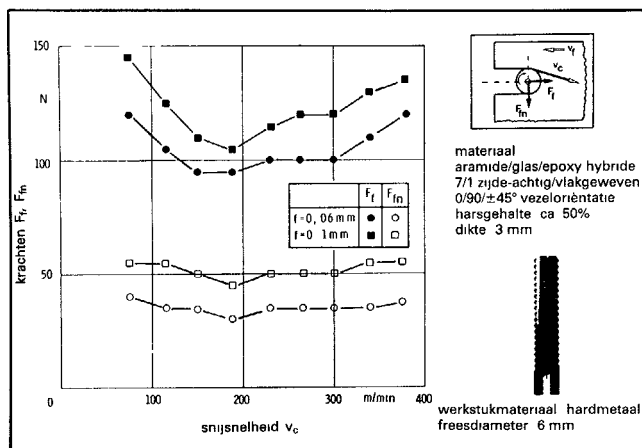
Figuur 15 Invloed van verspaningsparameters op krachten en oppervlakteruwheid van een koolstoflaminaat



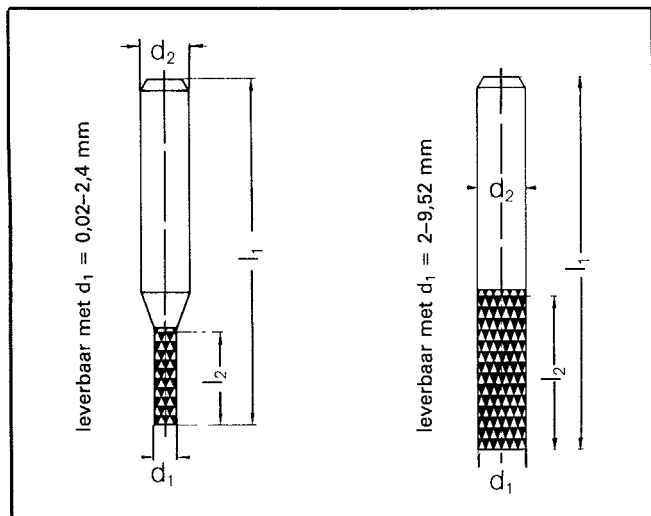
Figuur 16 Invloed van lengte voedingsweg op krachten en oppervlakteruwheid voor verschillende routers



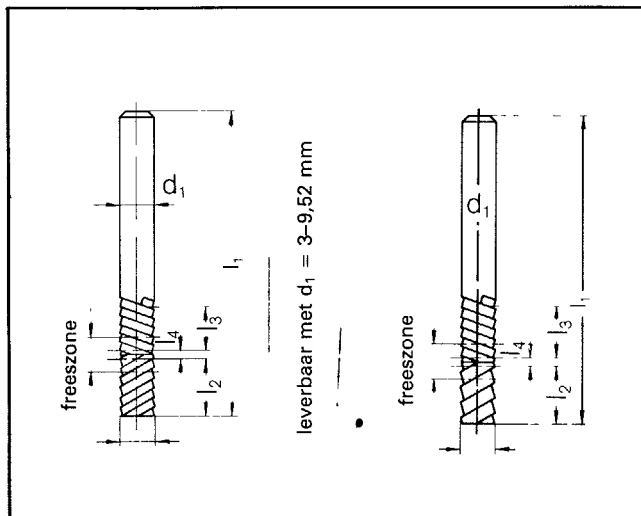
Figuur 17 Gereedschapsgeometrie van verschillende router-ontwerpen



Figuur 18 Invloed van verspaningsparameters op krachten bij routen van aramide-VVK



Figuur A Twee uitvoeringen van frezen met "Diamond Cut"; toepassing frezen van omtrekken en randen van platen voor gedrukte bedrading en VVK.



Figuur B Twee uitvoeringen van frezen met "tegengesteld gespiraliseerde snijkanten" links met voor beide delen gelijke vertanding en rechts met een deel fijne en een deel grove vertanding; toepassing. links aramidevezelversterkte kunststoffen tot 3 mm dik; rechts voor grotere dikten mits op goede hoogte ingesteld en uitgehard materiaal

niet ondersteund wordt door aangrenzende lagen. Een rechte snijkant (rechtsboven) geeft eerst een goed bewerkingsresultaat, maar na zeer korte snijweg ontstaat reeds rafelen in de toplagen [10]. Zelfs bij zeer hoge snijnelheden, die alleen met relatief grote diameters bereikt kunnen worden, kan dit niet geheel tegengegaan worden [24].

In tegenstelling tot een rechte of in een richting schroefvormig verlopende snijkant, geven tegengesteld verlopen- de snijkanten een wisselende kracht over het gehele snijoppervlak (rechts- onder) of krachten gericht van beide toplagen naar binnentoe (linksonder) te zien. Net als bij het boren is een radius van de snijkant van 10-15 µm het beste.

De frees linksonder, duwt de vezels continu naar het midden van het werkstuk en geeft minder dynamische krachten. Dit soort frezen kan alleen bij dikke laminaten gebruikt worden, omdat vanwege het kleine werkgebied een precieze positionering van de frees t.o.v. het materiaal noodzakelijk is. De frees verstopt snel, omdat de speciale vorm geen onbelemmerde spaanafvoer toelaat. De frees rechtsonder vertoont minder verstoppingsproblemen, maar geeft meer dynamische krachten: met dit ontwerp werd de hoogste door de bewerkingskwaliteit bepaalde optimale snijnsnelheid verkregen.

Noot: Andere bronnen geven aan dat met frezen volgens figuur B de beste resultaten verkregen worden.

Onder deze, van de voeding afhankelijke optimale snijnsnelheid stijgen de krachten aanzienlijk: het proces wordt instabiel en de oppervlaktekwaliteit daalt. Boven het optimum en bij lage voeding treedt verbranding op. Dit komt door de slechte warmtegeleiding van vezel en matrix. De in figuur 18 gevonden optimale snijnsnelheid $v_c = 190$ m/min is relatief laag. Voor dunne laminaten en vooral bij lossere weefsels is een hogere snelheid noodzakelijk. De snelheden bij het bewerken van aramideversterkte kunststoffen zijn echter steeds veel lager dan bij het bewerken van glas- en koolstofvezelversterkte kunststoffen.

In een vervolg op dit artikel wordt ingegaan op de bewerking van vezelversterkte kunststoffen door middel van waterstralen en laserstralen.

Dit vervolg wordt niet in Mikroniek geplaatst, zodat daarin geïnteresseerden wordt verzocht MB-Produktietechniek, Jaargang 52, no. 24, 23 december 1986, pag 647 e.v. te raadplegen.

Hieronder worden wel de technische conclusies t.a.v. de drie bewerkingstechnieken geplaatst, benevens de complete literatuurlijst. Voor de conclusies ten aanzien van de economische overwegingen wordt weer verwezen naar het bovengenoemde nummer van MB-Produktietechniek.

Conclusies

Zoals aangetoond werd in de vorige hoofdstukken, zijn de drie in dit artikel beschreven technieken, verspanen, waterstraalsnijden en lasersnijden, geschikt voor de meeste bewerkingen van VVK.

Mechanische gereedschappen als boren en frezen met scherpe snijkanten van hardmetaal, of beter nog van PCD, leveren goede prestaties in de meeste composietmaterialen. Voor glas- en koolstofvezels is een eenlipsboor of een conventioneel ontwerp met een top-hoek van 90° geschikt.

Waterstraalsnijden geeft geen enkele thermische beschadiging, maar er kan wel delaminatie of versplintering aan de uitgangszijde plaatsvinden. Dit gebeurt bij een te lage waterdruk of te hoge voedingsnelheid. Deze problemen kunnen tot op zekere hoogte opgelost worden door gebruik van speciale spuitmonden, die een minder coherente straal produceren, of door de stand-off afstand te vergroten. De snede krijgt dan wel een V-vorm. De verkregen oppervlaktekwaliteit bij dünnere laminaaten is vergelijkbaar met routeren, maar daalt snel met de snedediepte.

De **lasertechniek**, die bij glas- en aramidecomposieten toegepast kan worden, vereist een zeer precieze positionering van het brandpunt van de straal en een nauwkeurig in te stellen voedingsnelheid en hulpgasstroom. Vooral deze laatstgenoemde is naast de vermogensdichtheid en het intensiteitsprofiel de belangrijkste parameter ten aanzien van de thermische beschadiging van het materiaal. Dit is, behalve de rookontwikkeling, een van de grootste nadelen van de lasertechniek. Als single mode lasers worden gebruikt is de snede- en oppervlaktekwaliteit zeer goed, vooral bij dunne laminaaten.

Literatuur

- [1] N.N.: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde in der Kunststofftechnik; Der Konstrukteur 11/1984, p.p. 6-18.
- [2] Menges, G.: Werkstoffkunde der Kunststoffe; Carl Hanser Verlag, Wien 1985
- [3] Sachtling, H.- Kunststoff Taschenbuch; Carl Hanser Verlag, Wien 1983.
- [4] Schwartz, O Glasfaserverstärkte Kunststoffe; Vogel Verlag 1975.
- [5] N.N. At Ford and GM., Robots Quickly Trim Parts; Plastics Technology, June 1984, p.p. 23, 25
- [6] van Cleave, R.A.: Laser Cutting Plastic Materials, Bendix Division, Rev: BDX-613-2476 Kansas City, August 1980
- [7] van Cleave, R.A.: Laser Cutting Shapes in Plastics; Bendix Division, Rev BDX-613-2727 Kansas City, December 1981.
- [8] van Cleave, R.A.: Laser Cutting Plastics; Bendix Division, Rev BDX-613-2906 Kansas City, April 1983.
- [9] Vanderwert, T.L Machining Plastics...with Lasers; Manufacturing Engineering, November 1983, p.p 55-58.
- [10] König, W et al.: New Developments in Drilling and Contouring of Composites containing Kevlar; SAMPE Fifth Technology Conference 12th-14th June 1984, Vol. 2, Paper 16
- [11] König, W., Meis, F.U., Grass, P., Wulf, Ch en Willerscheid, H.: Konturbearbeitung faserverstärkter Kunststoffe; VDI-Z Bd. 126 (1984) Nr 21, p.p. 785-790.
- [12] König, W., Wulf, Ch Grass, P. en Willerscheid, H Endbearbeitungstechnologien für Faserverbundwerkstoffe; Vortrag auf dem Symposium "Stand der Fertigung bei technischen Teilen aus Faserverbundwerkstoffen", Aachen, 08.11.1984.
- [13] Autorenkollektiv: Innovation bei Fertigungsverfahren; Vortrag auf dem Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium, Aachen, 07/08 06 1984.
- [14] König, W., Schmitz-Justen, C.: Improvements in Machining Quality and Tool Life at Drilling and Countersinking of Composites with Kevlar; The Design and Use of Kevlar in Aircraft, DuPont, Genf 1982.
- [15] N.N. Untersuchung von Delaminationserscheinungen beim Bohren von CFK-Material, MBB WF Information 4/83, p.p 29-35.
- [16] Lampa, W Spanende Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen im Flugzeugbau, Vortrag auf der DGLR Jahrestagung, 17.-19. Okt. 1983, München
- [17] Menges, G., Neise, E Automatisierte Nachbearbeitung mit Industrierobotern; Vortrag auf dem Symposium "Stand der Fertigung bei technischen Teilen aus Faserverbundwerkstoffen" Aachen, 08.11.1984
- [18] N.N. A Guide to Cutting and Machining Materials Containing Kevlar Aramid Fiber; DuPont, Wilmington, December 1983.
- [19] Heintze, A.. Cutting and Machining Composites Reinforced with Kevlar 49; DuPont, Genf 1983.
- [20] Menges, G., Graufus, A., Neise, E. en Saars, M.: Nachbearbeitung von GFK-Bauteilen mit Industrierobotern, IDR 18 (1984) Nr. 2, p.p. 109 ff.
- [21] Ricciardi, G., Cantello, M. en Ghiringhello, G The Preliminary Tests on the Cutting of Composite Materials with Laser Beam, CIRP -Parijs, January 1984
- [22] Tonshoff, H.K., v. Hohensee: Umrisssfrasen von faserverstärkten Kunststoffen; unveröffentlichte Untersuchung, Hannover 1985.
- [23] Mackey, B.A How to Drill Precision Holes in Reinforced Plastics in a Hurry? Plastics Engineering, February 1980.
- [24] Wiendl, J.: Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Sonderwerkstoffen; Vortrag, Technische Akademie Esslingen, 18/19. März, 1985.
- [25] N.N. Roboter schneidet mit dem Wasserstrahl, VDI Nachrichten nr. 11/1985
- [26] N.N.: HD Wasserstrahlschneidtechnologie. Ein serienreifes Trennverfahren, Industrie Anzeiger, nr. 31/1982
- [27] Engemann, B.K.: Water Jet Cutting of Fibre Reinforced Composite Materials; Industrial + Production Engineering 3/1981
- [28] Jones, S.L.: Water Jet Cutting Advances; American Metal Market/Metalworking News, April 1982.
- [29] Reichmann, J.M en Chevny, J.B. Water Jet Cutting of Deep Kerfs; Paper E2, 4. International Symposium on Jet Cutting Technology (4.ISJCT) 1978, Kent (GB).
- [30] Yanaida, K Flow Characteristics of Water Jets; Paper A2, 2. ISJCT, 1974, Cambridge (GB).
- [31] König, W en Wulf, Ch.: The Influence of the Cutting Parameters on Jet Forces and the Geometry of the Kerf; Paper D2, 7 ISJCT, 1984, Ottawa (Can)
- [32] König, W. en Wulf, Ch Abschlussbericht zum DFG Forschungsvorhaben Nr. 361/33 Grundlagen und Technologie des Wasserstrahlschneidens.
- [33] Haferkamp, H., Louis, H en Schikorr, W.: Precise Cutting of High Performance Thermoplastics. Paper G2, 7 ISJCT, 1984, Ottawa (Can).
- [34] Walther, L. en Gerber, D. Infrarotmesstechnik; VEB Verlag Technik Berlin 1983.
- [35] N.N.: Materialbearbeitung mit CO₂ Hochleistungslasern; Rofin-Sinar, Hamburg
- [36] Engel, S.L. Laser Cutting of Thin Materials; Based on SME Paper No. MR 74-960 presented at the Lasers in Manufacturing Conference, Chicago, December 3-5, 1974
- [37] Tonshoff, H.K.: Comparison of LBM, Grinding, Milling and Jet Cutting to Machine Fiber Reinforced Plastics; 34-General Assembly of CIRP-Madison (USA), 24.08.1984.