



**Laser- en waterstraal-
snijden**
van gelamineerde en beklede plaat

ti.00.12



Tech Info

FME CWMM



Laser- en waterstraalsnijden van gelamineerde en beklede plaat

Toelichting:

Deze publicatie is er één uit een reeks die IOP-Metalen in samenwerking met de FME-CWM ten behoeve van industrie en onderwijs tot stand laat komen. De publicaties behandelen de onderwerpen in beknopte vorm. Zowel deze publicatie als de daarin beschreven onderzoeksresultaten zijn tot stand gekomen in het kader van het Innovatieve Onderzoekproject Metalen (IOP-Metalen). De projecten zijn van 1988 - 2000 uitgevoerd door een aantal universiteiten en researchinstituten, in opdracht en onder supervisie van Senter (Den Haag) namens het Ministerie van Economische Zaken.

De publicatie geeft een overzicht van het laser- en waterstraalsnijden als moderne snijtechnieken en de toepassing ervan op gelamineerde en beklede plaatmaterialen, waarbij de nadruk ligt op metaal als belangrijkste component. Het onderzoek is uitgevoerd door de Technische Universiteit Delft (waterstraalsnijden), de Universiteit Twente (lasersnijden) en TNO Industrie. Een deel van de in het onderzoek betrokken materialen zijn ter beschikking gesteld door DAF, Corus, Fokker, GBP, Rockwool Lapinus en Alcan.

Samengesteld door:

Dr.ir. R. de Graaf
Dr.ir. A.M. Hoogstrate
Ir. W. Husslage
Ing. D. van der Torre

Informatie over het onderwerp kan worden verkregen bij:

Technisch Universiteit Delft

Dr.ir. A.M. Hoogstrate, tel. 015-2786804, e-mail: a.hoogstrate@wb.tudelft.nl

HU*GE Laser bv

Ir. W. Husslage, tel. 0548-368117, e-mail: w.husslage@wxs.nl

Universiteit Twente

Prof.dr.ir. J. Meijer, tel. 053-4892527, e-mail: j.meijer@wb.utwente.nl

Informatie over en bestelling van Tech-Info-bladen, praktijkaanbevelingen en VM-publicaties:

Vereniging FME-CWM / Industrieel Technologie Centrum (ITC)

Correspondentie adres	Postbus 190, 2700 AD ZOETERMEER
Bezoekadres	Boerhaavelaan 40, ZOETERMEER
Telefoon	079-3531341/3531100
Telefax	079-3531365
E-mail	pbo@fme.nl
Internet	http://www.fme.nl

Laser- en waterstraalsnijden van gelamineerde en beklede plaat

Inhoud

Inleiding	1
Toegepaste materialen	3
Lasersnijden	5
Waterstraalsnijden	5
Vergelijking van laser- en waterstraalsnijden	6
Effecten op de materialen	9
Modelvorming van de snijprocessen	9
Modificaties van de snijkoppen	10
Conclusies	11
Referenties	12
Bijlage	13

Gelamineerde en beklede materialen kunnen ten opzichte van enkelvoudige materialen grote voordelen bieden, door de som van de gunstige eigenschappen van de materialen waaruit ze zijn samengesteld. Daartegenover staat dat het bewerken van deze materialen en daarmee het construeren in deze materialen problemen kan opleveren.

In deze publicatie wordt nader ingegaan op de verschillende aspecten van het laser- en waterstraalsnijden en de toepassing van deze scheidingstechnieken op verschillende soorten gelamineerde en beklede materialen. De toepassing in de industrie van abrasieve waterstraalsystemen is beperkt, maar neemt toe.

In deze publicatie wordt aandacht besteed aan de snedekwaliteit die met beide technieken kan worden verkregen. De nauwkeurigheid waarmee kan worden gesneden, wordt in belangrijke mate bepaald door het snijsysteem. In het bijzonder wordt dit bepaald door de nauwkeurigheid waarmee de snijkop de opgelegde contour kan volgen ten opzichte van het werkstuk.

1 Inleiding

Bewerken en snijden van laminaatmaterialen

Veel nieuw ontwikkelde materialen zijn samengestelde materialen. Deze materialen zijn gemaakt door combinatie van enkelvoudige materialen, zoals:

- een dragermateriaal van een deklaag voorzien;
- het lamineren in 2 of meer lagen van 2 of meer verschillende materialen;
- composietmaterialen.

Doel is hierbij dat een materiaal wordt verkregen met één of meerdere eigenschappen die grote functionele voordelen geeft. Een aantal voordeelaspecten, die met gelamineerde en beklede materialen kunnen worden verkregen, zijn:

- vermindering gewicht;
- toename sterkte;
- toename vermoeiingssterkte en/of scheurweerstand;
- verhoging slijtvastheid;
- verhoging corrosieweerstand;
- beïnvloeding warmtegeleiding; bijv. toename isolatie-eigenschappen.

Veel van deze materialen worden vervaardigd als plaatmateriaal. Om met deze materialen te construeren is er behoefte aan geschikte vormgevingstechnieken, zoals scheidingstechnieken, buigtechnieken en verbindingstechnieken. Indien deze technieken ontbreken of moeilijk toepasbaar zijn, staat dat de toepassing van deze materialen in de weg.

Door het verschil in eigenschappen van de materialen, waaruit de gelamineerde materialen zijn samengesteld, kunnen de vormgevingstechnieken niet zonder meer worden toegepast. Bij mechanische processen speelt het verschil in sterkte en taaheid een belangrijke rol, bij thermische processen speelt het verschil in fysische en chemische eigenschappen, zoals smeltpunt, warmtegeleiding en reactiviteit een belangrijke rol.

De meeste laminaatmaterialen kunnen niet worden gelast. Verbindingen zullen door mechanische technieken of lijmen tot stand moeten worden gebracht.

De diverse knipprocessen leveren problemen op door indrukking van het laminaatmateriaal of beschadiging van het oppervlak door het contact met de gereedschappen. Laser- en waterstraalsnijden zijn contactloze processen!

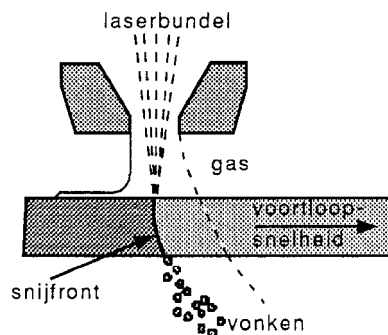
Hoewel elke scheidingstechniek zijn eigen kenmerken heeft, kunnen in de praktijk meerdere technieken worden toegepast. Veel technieken overlappen elkaar voor een deel; ze kunnen dus zowel concurrerend als complemen-

tair zijn. De keuze van een scheidingstechniek is in een bedrijfssituatie van vele factoren afhankelijk. In de bijlage wordt in de vorm van twee tabellen een overzicht gegeven van de meest voorkomende scheidingstechnieken, die worden toegepast voor het scheiden van plaat en profielen, op basis van een aantal verschillende proces- en toepassingskenmerken.

1.1 Lasersnijden

Het lasersnijden wordt in Nederland in ruim 200 bedrijven toegepast, waarvoor CO₂-lasers en Nd:YAG-lasers worden gebruikt.

Een laserstraal met een hoge energie-inhoud wordt op het te snijden plaatoppervlak gefocuseerd. Coaxiaal aan de laserbundel wordt via een uitstroomopening met kleine diameter gelijktijdig een gasstraal op het oppervlak gericht. Door absorptie van de laserenergie smelt het oppervlak zeer lokaal. De gasstroom zorgt voor uitdrijving van het gesmolten materiaal. Door de beweging van de laserbundel ten opzichte van het plaatoppervlak wordt een snede gegenereerd. Eén en ander is weergegeven in figuur 1.



figuur 1 Principe van het lasersnijden

Metalen, kunststoffen en keramische materialen kunnen uitstekend worden gesneden met CO₂-lasers. Met relatief grote snelheid, geringe snedebreëte en goede snedekwaliteit kunnen met de meeste commerciële snijsystemen nauwkeurigheden van minder dan 0,1 mm/m worden bereikt. Met de zwaarste CO₂-lasersnijbronnen (3,5 - 4 kW) kan staal tot ca. 20 mm, roestvast staal tot 12 mm en aluminium tot ca. 6 mm dikte met goede kwaliteit worden gesneden.

In veel bedrijven heeft het snijden met een CO₂-laser het scheiden door middel van knippen, ponsen, nibbelen, per-

sen, autogeen en/of plasmasnijden vervangen of is het als aanvulling op de reeds aanwezige scheidingstechnieken ingevoerd. In de plaatverwerkende industrie zijn machines waarbij lasergesneden én mechanisch kan worden gesneden populair.

Nd:YAG-lasers komen in 2 typen als snijlaser voor: gepulst of continu. Gepulste Nd:YAG-lasers worden met name voor fijn en nauwkeurig snijwerk toegepast. In metaalfolies van minder dan 0,2 mm kunnen snedebreedtes van minder dan 0,05 mm worden gerealiseerd. Sinds enige jaren zijn er ook continue Nd:YAG-lasers met vermogens van meerdere kilowatts. Met de commercieel verkrijgbare lasersnijsystemen kunnen metalen met goede snedekwaliteit tot een dikte van ongeveer 5 mm worden gesneden. Deze lasersnijmachines kunnen daarmee concurrerend zijn ten opzichte van bovengenoemde CO₂-lasers. De meeste kunststoffen en keramische materialen zijn niet goed met Nd:YAG-lasers te snijden, doordat deze materialen veelal transparant zijn voor de laserstraling. De bovengrens van de te snijden materiaaldikte neemt toe met het beschikbaar komen van geschikte laserbronnen met hogere vermogens. Met CO₂- en Nd:YAG-laserbronnen van 10 kW is aangetoond dat metalen van 40 mm dikte kunnen worden gesneden.

Voor het snijden wordt het snijproces ondersteund met een snijgas, dat naast de beschermende functie om te voorkomen dat spatten het optiek beschadigen, de functie heeft om het gesmolten en/of verbrande materiaal uit de snede te drijven.

Zuurstof wordt gebruikt bij het snijden van ongelegeerd en laaggelegeerd staal en draagt door zijn exotherme reactie in belangrijke mate bij aan de snelheid waarmee het snijden kan worden uitgevoerd. De gasdruk is het hoogst voor dun staalplaat (enige bars) en neemt af tot ca. 0,5 bar voor 15 tot 20 mm dik staal.

Roestvast staal en aluminium worden bij voorkeur met stikstof als goedkoopste inert gas gesneden, waarbij voor de grootste diktes gasdrukken tot 20 bar worden toegepast.

Er zijn beperkingen bij het lasersnijden van laminaatmaterialen door het verschil in fysische eigenschappen, waaruit de laminaatmaterialen zijn samengesteld. Er is namelijk een sterk verschil in wisselwerking van de laserstraling met de verschillende materialen.

Belangrijke pluspunten van het lasersnijden zijn:

- + grote flexibiliteit voor het snijden van vlakke producten;
- + grote contourvrijheid;
- + grote snijsnelheid;
- + goede snedekwaliteit en geringe snedebreedte (0,2 - 0,3 mm);
- + automatiseerbaar.

Minpunten zijn:

- snijproces is thermisch proces met daardoor warmte beïnvloede zone (wbz);
- veel parameters kunnen het proces beïnvloeden;
- hoge investering;
- beperkingen ten aanzien van materialen; moeilijk snijbaar zijn onder andere hoogreflecterende materialen en laminaten.

De investeringskosten voor een snijsysteem zijn in sterke mate afhankelijk van de grootte van de bewerkingstafel, het vermogen van de laserbron en de opties met betrekking tot belading en ontlading. Lichte systemen voor het snijden van kunststof en metaalplaat beginnen qua prijs bij ca. f 350.000,-. Investeringsbedragen van f 1.000.000,- of meer voor wat grotere systemen zijn niet ongewoon. Figuur 2 toont een voorbeeld van een industrieel lasersnijsysteem.



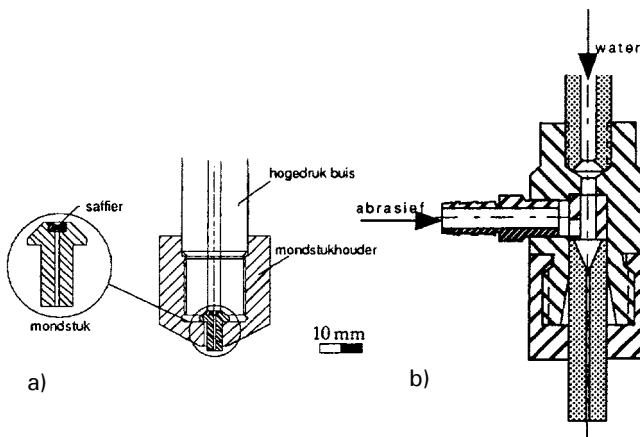
figuur 2 Industrieel lasersnijsysteem

1.2 Waterstraalsnijden

Hoewel het waterstraalsnijden een al lang bestaande techniek is, wordt deze in Nederland slechts in beperkte mate industrieel toegepast.

Het waterstraalsnijden wordt zowel zonder toevoeging van een abrasief als met toevoeging van een abrasief toegepast. Het snijden zonder abrasief wordt met name gebruikt voor het snijden van zachte en dunne materialen. De druk blijft beperkt tot 1000 bar.

De abrasieve waterstraal wordt in twee stappen gegeneerd. In de eerste stap wordt het water met een druk van 3500 bar door een gaatje van 0,1 tot 0,4 mm in een saffier of een diamant naar buiten geperst. De snelheid van de waterstraal bedraagt ongeveer 850 m/s. In de tweede stap komt de waterstraal in de mengkamer. Door onderdruk in de mengkamer ontstaat er een luchtstroom, die als drager fungeert voor de abrasieftoevoer. De meest toegepaste soort abrasief is granaatzand met een korrelgrootte van ca. 100 µm en een dosering tussen de 250 en 500 gram/ minuut. De abrasiefdeeltjes worden door de waterstraal versneld tot snelheden van 250 tot 300 m/s. Tenslotte wordt de abrasieve waterstraal met behulp van een focusseerbuis met een diameter van ca. 0,8 mm gevormd tot een coherente straal. In figuur 3 zijn respectievelijk een type straalvormer zonder (a) en met een abrasieve toevoer (b) weergegeven.



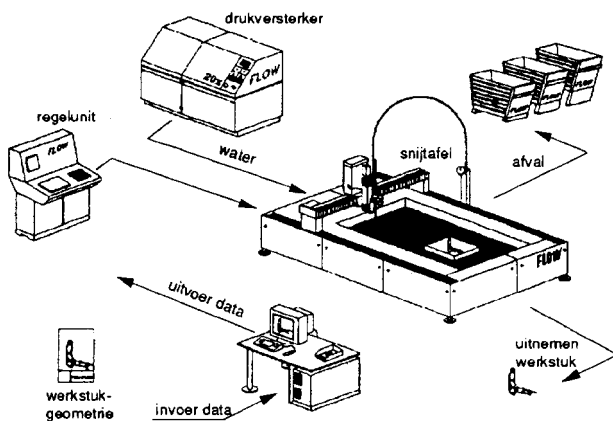
figuur 3 Straalvormer voor het genereren van een pure waterstraal (a); straalvormer met abrasieftoevoer (b)

Een goede uitlijning tussen de waterstraal en de focusseerbuis is van essentieel belang voor het goed functioneren van de abrasieve waterstraalsnij-installatie. Slechte uitlijning heeft matige snijprestaties tot gevolg en leidt tot versnelde slijtage van de focusseerbuis. Met de nieuwste slijtvaste materialen kunnen standtijden tot ruim 100 uur worden bereikt.

Waterstraalsnijden komt in aanmerking in onder andere de metaalverwerkende industrie als scheidingstechniek en kan daarbij in de plaats komen of een aanvulling zijn op de meer conventionele scheidingstechnieken.

Een abrasieve waterstraalsnijmachine bestaat in principe uit 4 componenten (zie ook figuur 4):

- ▶ een installatie om de hoge waterdruk op te wekken, die meestal bestaat uit een lagedrukpomp die de druk tot 100 à 350 bar opvoert en een intensifier (drukversterker) die de druk tot 3500 à 4000 bar opvoert;
- ▶ een spuitkop, waarin de potentiële energie van het water (onder hoge druk) wordt omgezet in kinetische energie van de abrasiefdeeltjes;
- ▶ een bewerkingsstation die de beweging van de spuitkop ten opzichte van het werkstuk bewerkstelligt. Het bewerkingsstation zal veelal een vlakke snijtafel of een industriële robot zijn;
- ▶ een installatie die de resterende straalenergie opvangt en het gebruikte abrasief en het gesneden materiaal opvangt en verwerkt.



figuur 4 Overzicht componenten abrasief waterstraalsnijstelsysteem

Evenals bij de lasersnijsystemen zijn de investeringskosten relatief hoog en beginnen bij ca. f 300.000,-. De kosten van complete industriële systemen zijn uiteraard afhankelijk van onder andere het pompvermogen, tafelgrootte, aantal snijkoppen, enz. en bedragen echter minimaal f 750.000,-. In figuur 5 is het waterstraalsnijden van messing te zien.

Belangrijke voordelen van het abrasief waterstraalsnijden zijn:

- + grote flexibiliteit voor het snijden van vlakke producten;
- + grote contourvrijheid;
- + zeer goede snedekwaliteit is haalbaar;
- + proces is weinig gevoelig voor diktevariaties
- + het is een "koud" proces;
- + toepasbaar op veel materialen, incl. laminaatmaterialen en composieten.

Als nadelen kunnen worden beschouwd:

- lage snelheid bij hoge snedekwaliteit;
- "nat" proces;
- hoge investering;
- beperkte levensduur straalbuis als gevolg van slijtage;
- beperkingen t.a.v. het snijden van dunne materialen.

2 Toegepaste materialen

2.1 Kenmerken laminaatmaterialen

Het doel om laminaatmaterialen te ontwikkelen en te produceren is dat aanzienlijke voordelen kunnen worden



figuur 5 Het waterstraalsnijden van messing (Resato Int. BV)

behaald door specifieke functionele eigenschappen van de afzonderlijke materialen door lamineren te combineren. Voordeelaspecten die met laminaatmaterialen worden verkregen hebben in de meeste gevallen betrekking op:

- vermindering gewicht;
- toename sterkte;
- toename scheurweerstand;
- verhoging slijtvastheid;
- verhoging corrosiebescherming;
- vermindering warmtegeleiding.

Naast voordelen kunnen er ook nadelen of beperkingen aan laminaatmaterialen verbonden zijn. Eén van de belangrijkste beperkingen is dat laminaatmaterialen in het algemeen dikker zijn dan de meest gebruikelijke eenvoudige constructiematerialen

2.2 Materialen

De materialen die voor het onderzoek zijn geselecteerd, zijn in tabel 1 samengevat.

Arall en Glare

Beide materialen zijn tot ontwikkeling gekomen door de behoefte aan materialen in vliegtuigconstructies met een hogere sterkte/gewicht verhouding, betere vermoeiingssterkte en betere scheurweerstand als de tot dusverre in aanmerking komende hoogsterke aluminium- en titaniumlegeringen. Door combinatie van hoogsterke vezelversterkte kunststoffen en hoogsterke aluminiumsoorten wordt een hoge sterkte/gewicht verhouding bereikt. Tabel 2 geeft de karakterisering van de beide materialen weer.

De sterkte van de materialen is afhankelijk van de aluminiumsoort, het aantal lagen en de soort en oriëntatie van de vezels. Tabel 3 geeft voor Arall een indruk van de minimaal gespecificeerde treksterkte (Rm) en rek-grens (Rp) in langs- en dwarsrichting.

Door in het ontwerp goed gebruik te maken van de hoge sterkte in de langsrichting kan een gewichtsbesparing van 40% worden bereikt.

De gebruikelijke scheidingstechnieken voor deze materialen zijn knippen en frezen. Knippen kan resulteren in delaminatie aan de knipranden. Delaminatie wordt niet getole-

tabel 1 Geselecteerde laminaatmaterialen

materiaal	omschrijving	dikte [mm]	belangrijkste eigenschappen	potentiële toepassingen
Glare	3 tot maximaal 11 lagen afwisselend lagen aluminium en lagen glasvezel in epoxy	0,3 per laag	sterk en licht	transport; i.h.b. vliegtuigonderdelen
Arall	3 tot maximaal 11 lagen afwisselend lagen aluminium en lagen twaron- of kevlarvezels in epoxy	0,3 per laag	sterk en licht	transport; i.h.b. vliegtuigonderdelen
Hylite	3 lagen: toplagen: aluminium tussenlaag: polypropyleen (PP) of ABS	1,2 - 2,0	sterk en licht	transport; bodydelen, containers
Bombal H	3 lagen: toplagen: staal, tussenlaag: (zeer dun) pasta	2	sterk, geluiddempend	auto-onderdelen: brandstoftank, oliepan
Sandwich/honingraat	3 lagen: toplagen: aluminium, Hylite; tussenlaag: honingraat van aluminium of polycarbonaat (PC)	15 - 25	sterk, licht, stijf, warmte-isolerend	transport; vleugels, vloeren, scheidingswanden
Duralcan	metaal-matrix-composiet (MMC): matrix: aluminium; deeltjes: aluminiumoxide (Al ₂ O ₃)	3	sterk, goede warmtegeleiding	dragermateriaal voor chips, spuitgietmatrijzen
Conrock	3 lagen: toplagen: aluminium, (gecoat) staal tussenlaag: samengeperst steenwol	50 - 150	licht, stijf, warmte-isolatie, geluidwerend	vloeren, gevelbekleding, (scheidings)wanden

tabel 2 Karakterisering van Arall en Glare

materiaal	Arall	Glare
aantal lagen (n≤5)	2n + 1	
metaal	Al 7475 T76 of Al 2024 T3	
tussenlaag	vezelversterkte kunststof: vezels: kevlar (DuPont) of twaron (AKZO); kunststof: epoxy	vezelversterkte kunststof: vezels: glas; kunststof: epoxy
laagdikte	0,3 mm/laag	
vezelrichting	unidirectioneel	multidirectioneel

tabel 3 Sterkte van Arall in langs- en dwarsrichting

materiaal-sterkte	langsrichting		dwarsrichting	
	3 lagen	9 lagen	3 lagen	9 lagen
Rm [MPa]	720	800	390	320
Rp [MPa]	520	580	340	260

reerd. Het alternatief frezen dient met de nodige zorgvuldigheid te worden uitgevoerd, opdat er geen vezels uit de bewerkte snijkant worden getrokken.

Hylite

Corus heeft een materiaal ontwikkeld op basis van aluminium en kunststof met de sterkte en stijfheid van dun staalplaat. De vergelijkingstabel (tabel 4) laat voor gelijke belastingssterkte en buigstijfheid van Hylite, staal en aluminium het grote gewichtsvoordeel zien van Hylite ten opzichte van staal en aluminium.

De in het onderzoek betrokken materialen waren gemaakt van:

- 0,2 mm dik aluminium Al 5182 in een zachte conditie (O) en een harde conditie (H18) als boven- en onderplaat en
- met een 0,8 respectievelijk 1,6 mm dikke tussenlaag van polypropyleen.

tabel 5 Opbouw sandwich-honingraatpanelen

materiaal	bovenlaag	dikte	honingraatkern	dikte	onderlaag	dikte	totale dikte
mat. 1	Hylite (hard)	1,2 mm	aluminium	22,4 mm	Hylite (hard)	1,2 mm	24,8 mm
mat. 2	Hylite (hard)	1,2 mm	Polycarbonaat (PC)	20,0 mm	Hylite (hard)	1,2 mm	22,4 mm
mat. 3	aluminium	0,8 mm	aluminium	22,4 mm	aluminium	0,8 mm	24,0 mm

tabel 4 Vergelijking van Hylite met staal en aluminium

eigenschappen	staal	aluminium	Hylite
dikte [mm]	0,74	1,06	1,2 (0,2+0,8+0,2)
gewicht [kg/m ²]	5,8	2,9	1,8
buigstijfheid [kNmm]	7,1	7,1	7,1
max. rek [%]	30 - 40	20 - 25	18 - 20
deukweerstand t.o.v. staal [%]	100	90	80

Bombal H

Bombal H is een ca. 2 mm dik laminaat dat bestaat uit twee 1 mm dikke staalplaten van het zeer goed vervormbaar IF-staal ("interstitial free") met daartussen een sleet van ca. 0,05 mm die een bitumineuze pasta bevat. Het is hierdoor zeer geluiddempend. Het materiaal wordt vanwege deze eigenschap en de dubbelwandigheid toegepast op plaatsen in auto's, die onderhevig zijn aan impact, zoals de carter- of oliepannen.

Sandwich-honingraatpanelen

Sandwich-honingraatpanelen worden vanwege de relatief grote stijfheid/gewicht verhouding toegepast in zelfdragende plaatvelden en in constructies waar warmte- en/of geluidsisolatie van belang is. De beschikbaar gestelde materialen waren op de wijze samengesteld zoals in tabel 5 weergegeven.

Duralcan

Duralcan is een metaal-matrix-composiet. Metaal-matrix-composieten worden gekenmerkt door een metaalmatrix die gevuld is met een 'vul'materiaal. Dit versterkt in het algemeen één of meerdere eigenschappen van de composiet. Veelal zal dit de sterkte en/of slijtvastheid betreffen. Ook het gewicht (licht), uitzettingscoëfficiënt, warmtegeleiding, kruipsterkte, dempingsgedrag kunnen aspecten zijn. Door de grootte, vorm en hoeveelheid (10 - 50%) van het vulmateriaal zijn de eigenschappen te beïnvloeden. Door de beperkte toepassing zijn de materialen relatief

duur. Voor het onderzoek was een 3 mm dikke plaat beschikbaar, gemaakt van de aluminiumlegering Al 6061, die 10% aluminiumoxide-deeltjes met een grootte van 10 - 20 µm bevat.

Conrock sandwichpanelen

Conrock sandwichpanelen zijn laminaatmaterialen die bestaan uit een 50 tot 150 mm dikke laag samengeperst steenwol met als deklagen een ca. 1 mm dikke aluminium- of staalplaat. Ze worden tot een breedte van 1,2 m en tot een lengte van 10 m vervaardigd. Deze panelen worden op grote schaal in de utiliteitsbouw toegepast, onder andere voor wanden en vloeren. Ze zijn licht en stijf en zijn zeer goed warmte-isolerend en redelijk geluidsisolerend.

3 Lasersnijden

3.1 Experimenten

Het experimentele programma is met twee typen CO₂-lasers en één type Nd:YAG-laser uitgevoerd. Enige gegevens van de gebruikte lasers staan in tabel 6.

tabel 6 Toegepaste lasers van de Universiteit Twente

Laser	RS 1700RF	OPL 3500	Haas HL2006D
type	CO ₂ -laser	CO ₂ -laser	CW Nd:YAG-laser
max. vermogen [W]	1700	1500/3500	2000
bundel transport	spiegels	spiegels	0,6 mm glasvezel
bundelkwaliteit	TEM 01*	TEM00/ TEM01*	25 mm.mrad
bundeldiameter [mm]	17	16	0,6 mm glasvezel

In eerste instantie is met de standaard lasersnijkop met een focusseerlens van 100 mm met de RS 1700RF CO₂-laser de toepasbaarheid van het lasersnijden op de verschillende laminaatmaterialen beoordeeld.

De geteste materialen vertoonden de volgende resultaten:

- ▶ Met uitzondering van de honingraat- en Conrock sandwichpanelen lieten de materialen het volgende zien:
 - lichte braamvorming;
 - thermische aantasting van kunststoflagen;
 - afzetting van metallisch materiaal in de beschadigde kunststoflagen.
- ▶ De honingraat- en de Conrock sandwichpanelen zijn niet of nauwelijks te snijden door de grote divergentie van de laserbundel ten opzichte van de materiaaldikte.

3.2 Nauwkeurigheid bij het snijden

Bij de uitvoering van het onderzoek is geconstateerd dat bij het snijden van cirkels en haakse bochten ongewenste overshoot en afrondingen kunnen ontstaan als gevolg van systeembependingen. Dit geldt zowel voor de snijtafel als de gebruikte software.

Contourafwijkingen bij het snijden van cirkels kunnen worden vermeden door aanpassing van snelheid (en vermogen). Contourafwijkingen bij scherpe bochten kunnen worden vermeden door bij het naderen van de bocht de snelheid te verminderen en na het passeren deze weer toe te laten nemen onder gelijktijdige aanpassing van de snij-instellingen voor het behoud van snedekwaliteit, snedebreedte en uiterlijk van de snijkant.

In hoofdstuk 5, waarin het lasersnijden en waterstraalsnijden worden vergeleken, zal nader op de verschillende kenmerken van de snijkant en de eigenschappen worden ingegaan.

4 Waterstraalsnijden

Het onderzoek naar het waterstraalsnijden had de volgende doelen:

- ▶ onderzoek naar de toepasbaarheid van het abrasief waterstraalsnijden op laminaatmaterialen;
- ▶ onderzoek naar het snijmechanisme van het abrasief waterstraalsnijproces;
- ▶ onderzoek naar verbeteringen van het snijproces.

4.1 Beschrijving snijgedrag van materialen

De abrasieve deeltjes raken het werkstukmateriaal met een niet gedefinieerde snijkant en nemen op microniveau een spaantje af.

Doordat het snijproces een mechanisch proces is, kan nagenoeg elk materiaal worden gesneden, waarbij de weerstand van het werkstukmateriaal tegen de abrasiefdeeltjes de bepalende factor is. Zachte materialen kunnen relatief snel ten opzichte van harde materialen worden gesneden. Ook laminaatmaterialen zullen goed kunnen worden gesneden; bestanddelen met minder weerstand zullen sneller verspaand worden dan bestanddelen met meer weerstand.

Tijdens het verspaningsproces draagt de abrasieve waterstraal energie over aan het werkstukmateriaal en verliest daardoor zelf energie. Dit heeft twee effecten:

- ▶ de verspaningscapaciteit van de straal wordt minder, wat zich uit in een kleinere lokale snedendoorsnede: V-vormige snijspleet;
- ▶ de stabiliteit van de straal wordt minder, doordat de impuls van een abrasiefdeeltje afneemt. Hierdoor zal de straal afbuigen van het zojuist gevormde snijfront. Dit uit zich op macroschaal door een "zoekend" straalgedrag.

4.2 Snedekwaliteit

De belangrijkste parameters die de snedekwaliteit in de doorsnede beïnvloeden zijn:

- ▶ voedingssnelheid: hoe hoger de voedingssnelheid is, hoe V-vormiger de snede is; bij een te hoge snelheid zal het materiaal niet meer worden gesneden;
- ▶ abrasiefhoeveelheid: hoe hoger de toegevoerde abrasiefhoeveelheid is, hoe minder coherent de resulterende straal zal zijn; dus hoe A-vormiger de snede.

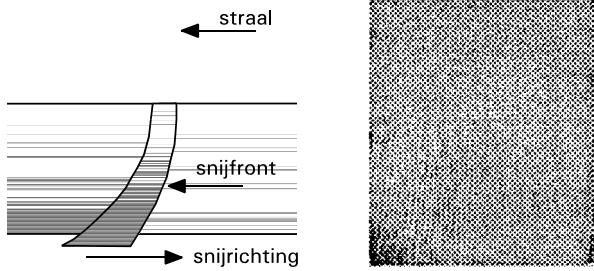
Ook de ingestelde waterdruk is van belang. In de industriële praktijk zal altijd met de maximale waterdruk worden gewerkt, omdat hierbij een maximale energieoverdracht wordt verkregen.

Door een juiste keuze van voedingssnelheid en abrasiefhoeveelheid kunnen het smaller worden van de straal (V-vorm) en het uitwaaiëren van de straal (A-vorm) elkaar compenseren, zodat een rechte snede ontstaat.

Hogere voedingssnelheden vereisen een hogere abrasiefhoeveelheid om tot een acceptabele snede te komen.

De kwaliteit in het bovenaanzicht hangt nauw samen met de afstand van de straal tot het werkstuk. Bij toenemende afstand zal de straal meer interactie met de omringende lucht hebben, waardoor de buitenmantel van de straal zijn verspanend vermogen verliest. Dit uit zich op het werkstuk als een beschadigde zone naast de snede. In de praktijk is de afstand tussen focusseerbuis en werkstuk 0,5 tot 1 mm. Bij deze afstand is de snedebreedte aan de bovenzijde gelijk aan de diameter van de uit tredende waterstraal.

De kwaliteit van de snijkant varieert over de snedediepte. Bovenaan is het gesneden oppervlak glad, onderaan golfd. Dit golfpatroon is karakteristiek voor straal-snijprocessen en ontstaat doordat de straal aan de onderzijde najlt of naloopt ten opzichte van de bovenzijde (figuur 6). De naloopt wordt minder (en de snede minder V-vormig) naarmate de voedingssnelheid lager is.



figuur 6 Links: straalafbuiging bij het waterstraalsnijden
Rechts: zijaanzicht van snede in 70 mm aluminium

De contourkwaliteit wordt bepaald door het dynamisch gedrag van het bewerkingsstation en door de naloop, die tegengesteld is aan de bewegingsrichting. De waterstraal zal aan de onderzijde van het werkstuk een grotere diameter hebben dan aan de bovenzijde. Voor een scherpe contourovergang dient de voedingsnelheid te worden teruggebracht en na de overgang weer te worden opgevoerd. Zonder aanpassing van de abrasiefhoeveelheid zal dit tot een verbreding van de snede ter plaatse van de overgang leiden.

4.3 Snijden van laminaatmaterialen

Slechts door variatie van de voedingsnelheid is het bij de instelling van één type abrasieve waterstraal – gedefinieerd door waterdruk, diameter, abrasieftype en -hoeveelheid – mogelijk een groot aantal verschillende materialen met verschillende snedekwaliteit te snijden. Voor het snijden van laminaatmaterialen wordt de voedingsnelheid afgestemd op de moeilijkst te snijden component.

Verandering van het snijmechanisme kan optreden bij glasvezelversterkte materialen (Glare): glasvezels die getroffen worden door abrasiefdeeltjes met hoge snelheid worden gesneden met een glad snijoppervlak. Echter glasvezels die getroffen worden door abrasiefdeeltjes met lagere snelheden, worden niet direct gesneden. Ze breken, doordat het omringende zachtere materiaal dat de vezels ondersteunt, eerst verwijderd wordt.

4.4 Gatsteken en delaminatie

Het snijden van inwendige contouren vereist een startgat. Indien het maken van een startgat (insteken) met de waterstraal niet zorgvuldig wordt uitgevoerd, is de kans dat delaminatie optreedt groot. Delaminatie is het verschijnsel dat de hechting tussen de lagen verloren gaat. Onderzoek heeft aangetoond dat het werkgebied, weergegeven door de hoofdparameters waterdruk en snijsnelheid, voor het snijden van laminaatmaterialen nagenoeg altijd ligt in het gebied waar delaminatie kan optreden. Het startgat kan echter zonder delaminatie bij een veel lagere waterdruk worden gemaakt. In figuur 7 zijn de werkgebieden voor het gatsteken en het snijden voor het materiaal Hylite weergegeven.

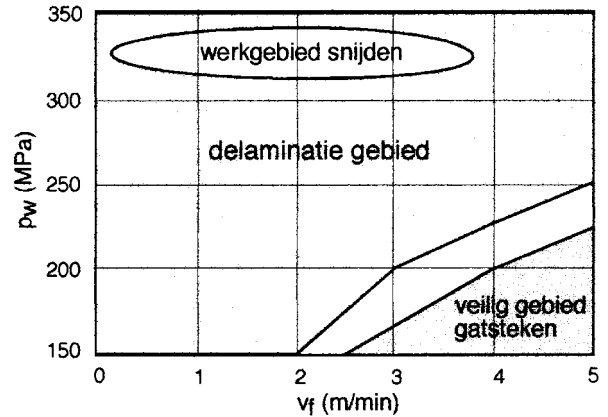
5 Vergelijking van laser- en waterstraal-snijden

5.1 Procescondities en beoordelingscriteria

Bij de uitvoering van de snijproeven op de verschillende materialen zijn op basis van ervaring, ervaringsgegevens en door het systematisch variëren van de machine-instellingen de **optimale condities** bepaald voor het snijden van de in het onderzoek betrokken materialen.

Onder optimaal wordt verstaan een zo goed mogelijke snedekwaliteit bij een zo groot mogelijke snelheid.

Bij de experimentele bepaling van de instellingen vindt de beoordeling van de snedekwaliteit plaats door visuele



figuur 7 Werkgebieden voor gatsteken en snijden in Hylite

inspectie van de snede en beoordeling van de braam (door kijken en voelen met de vinger). Bij het lasersnijden is gebleken dat voor nagenoeg alle onderzochte materialen braamvorming niet te vermijden is, zodat voor de instellingen bij het lasersnijden gezocht is naar de instelling met de geringste braam.

Bij waterstraalsnijden wordt de optimale instelling begrensd door twee uitersten:

- ▶ minimale braam met een enigszins tapse snede, echter met een zo hoog mogelijke snelheid; dat is de snelheid dat juist volledige scheiding plaats vindt en
- ▶ minimale braam met een nagenoeg haakse snede, maar met een snelheid die aanzienlijk lager is.

De maximale en minimale snelheid kunnen een factor 4 tot 5 verschillen!

In de eerste fase van het project is gesneden met de snijkop, zoals die standaard op de betreffende machine aanwezig was. In de laatste fase van het project zijn proeven uitgevoerd met een aangepaste snijkop. In tabel 7 worden voor het laser- en waterstraalsnijden de optimale snijcondities voor de verschillende onderzochte materialen aangegeven. Voor lasersnijden is dit één conditie (met uitzondering van Hylite 1,2 mm); voor het waterstraalsnijden zijn dat de minimale en de maximale snelheid bij instellingen, zoals vermeld in tabel 8. In deze tabel zijn de algemene proefcondities voor het waterstraalsnijden weergegeven.

5.2 Nauwkeurigheid bij het snijden, snedebreeds

Bij de uitvoering van het onderzoek is geconstateerd dat bij het maken van (haakse) bochten ongewenste overshoot en afrondingen kunnen ontstaan. Overshoot neemt toe met toenemende snelheid. Bij het lasersnijden wordt dit veroorzaakt door systeembepalingen (snijtafel en software). Bij het waterstraalsnijden is de snelheid aangepast zonder verdere aanpassing van de snij-instellingen, waardoor ter plaatse van de bocht de snede zich verbreedt. Bij haakse bochten zal de buitenhoek (gezien vanuit het werkstuk) scherp zijn en zal de binnenhoek een radius van ongeveer 0,1 mm bij het lasersnijden en 0,4 mm bij het waterstraalsnijden hebben (figuur 8).

De snedebreeds is verschillend voor lasersnijden en waterstraalsnijden. Bij het lasersnijden is de bundel in het brandpunt ongeveer 0,25 mm. Onder optimale snijcondities zal voor materialen tot enige millimeters dikte de snedebreeds ongeveer deze breedte hebben.

De abrasieve waterstraal treft het oppervlak met een bundeldiameter van ongeveer 0,80 mm. De snede is taps met een breedte aan de intreezijde van ongeveer 0,8 mm. De rechtheid van de snede neemt toe naarmate de bewerkingsnelheid lager is met slechts een geringe toename van de snedebreeds aan de intreezijde (figuur 9).

tabel 7 Snijparameters per materiaalsoort

materiaal	lasersnijden				waterstraalsnijden	
	vermogen [W]	snelheid [mm/s]	focuslengte [mm]	gasdruk [bar]	minimum snelheid [mm/min]	maximum snelheid [mm/min]
Hylite 1,2 mm	1700/2000	100/150	63,5/101,6	10/15	1000	4000
Hylite 2 mm	1700	80	63,5	10	1000	4000
Arall-3 lagen	1700	200	63,5	10	1000	2000
Arall-5 lagen	Gepulst	40	63,5	20	1000	4000
Arall-11 lagen	Gepulst	25	101,6	20	750	3000
Glare-3 lagen	1700	200	63,5	20	1000	4000
Glare-5 lagen	Gepulst	30	63,5	20	1000	4000
Glare-7 lagen	1700	60	63,5	20	1000	4000
Glare-9 lagen	1700	70	101,6	20	1000	
Bombal H	2000	40	101,6	15	200	
Sandwich/honingraat	niet mogelijk				niet redelijk mogelijk	
Duralcan	1700	50 - 70	63,6	10	750	
Conrock 50 - 150 mm	niet mogelijk				niet mogelijk	

tabel 8 Procescondities waterstraalsnijden, algemene gegevens

parameters	alle materialen m.u.v. Bombal H	Bombal H
waterdruk	333 MPa	333 MPa
diameter mondstuk	0,3 mm	0,3 mm
diameter focusseerbuis	1,1 mm	1,1 mm
afstand tot werkstuk	1 mm	1 mm
abrasief	0,57 kg/min	0,25 kg/min
abrasieftype	HPBarton #60	Olivin ASF 60

5.3 Naloop

Zowel het laser- als het waterstraalsnijden gaat gepaard met naloop: het snijfront in de dikterichting loopt terug; de uittredende bundel blijft achter t.o.v. de intredende bundel. Het naloop-effect treedt het sterkst op bij waterstraalsnijden en is het grootst bij die snelheid, dat nog juist scheiding optreedt. De snede is dan het meest conisch en de snijlijn aan de uittreezijde zal minder strak zijn dan aan de intreezijde. Een sterke naloop draagt bij (haakse) bochten bij tot aansluitproblemen aan de uittreezijde.

5.4 Waterstraalsnijeffecten

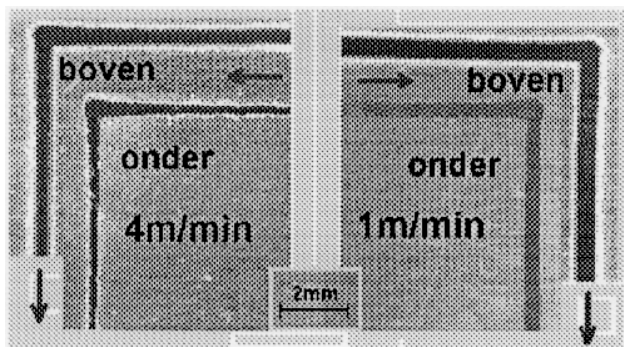
Arall, Glare, Hylite, Bombal H en Duralcan kunnen met een abrasieve waterstraal goed worden gesneden (figuur 10).

De honingraat-sandwichmaterialen, waarin in de dikterichting grote dikteverschillen worden ontmoet, zijn niet of nauwelijks te snijden. Bij de Conrockpanelen zal na doorsnijding van de stalen of aluminium bovenplaat de waterstraal in het zachte steenwollaag divergeren en is de energiedichtheid te gering om de onderplaat te kunnen doorsnijden.

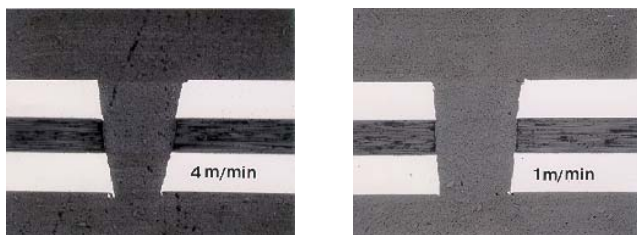
De weerstand van de verschillende laminaatlagen voor waterstraalsnijden komt het sterkst tot uiting in de doorsneden van dikkere laminaatmaterialen door het verschil in rechteid van opeenvolgende harde en zachte lagen. Het verschil is het sterkst als met snelheden wordt gesneden, waarbij nog juist scheiding optreedt.

5.5 Lasersnijeffecten

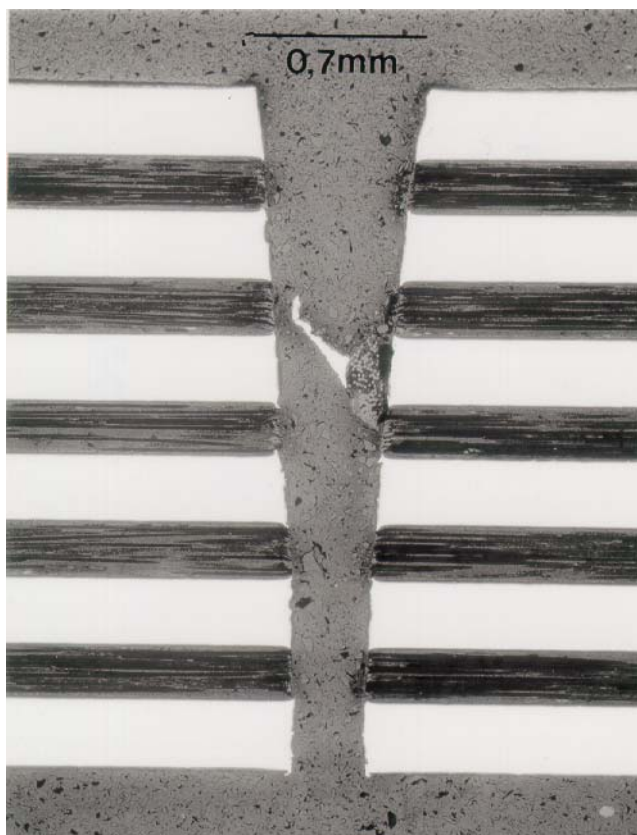
Bij zowel Arall, Glare als Hylite zijn de metaallagen van aluminium. Aluminium als enkelvoudig plaatmateriaal heeft een beperkt werkgebied ten aanzien van de laserinstellingen om het braamvrij te snijden. Bij het snijden van laminaatmaterialen met meerdere aluminiumlagen is het daardoor nagenoeg uitgesloten dat er instellingen kunnen worden verkregen waarmee braamvrij kan worden gesneden. De bepaling van de optimale laserinstellingen is er dan ook op gericht om de braamvorming van laminaatmaterialen te minimaliseren.



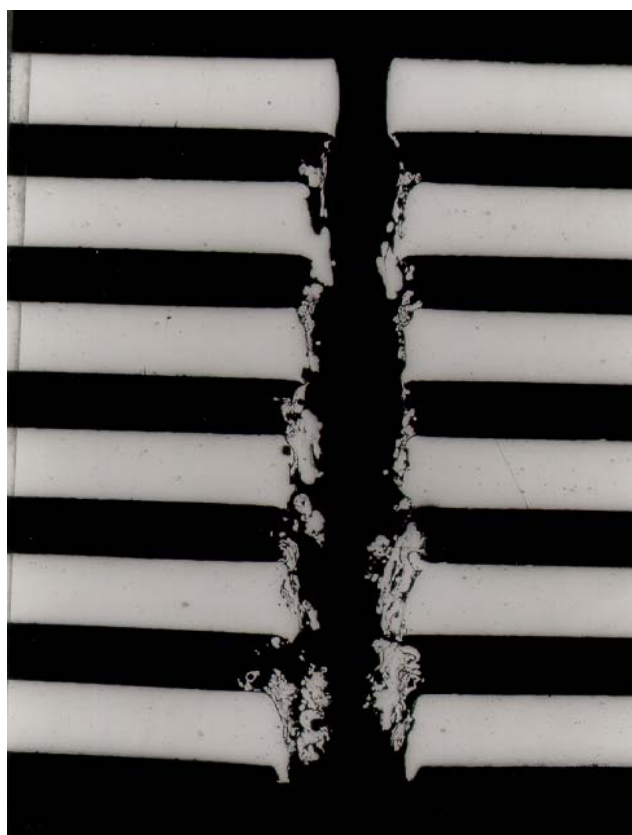
figuur 8 Snedebreedte aan boven- en onderzijde bij het waterstraalsnijden van Glare-5 lagen; links: 4 m/min; rechts: 1 m/min



figuur 9 Waterstraalsnijden van Glare-3 lagen; links: 4 m/min, rechts: 1 m/min



figuur 10 Waterstraalsnijden van Arall-11 lagen; 3m/min



figuur 11 Doorsnede van lasergesneden Arall-11 lagen

De bovenlaag wordt altijd met zeer goede kwaliteit gesneden, de volgende lagen worden minder netjes gesneden:

- kunststoflagen worden sterk aangetast (uitholling), met name bij Arall en Hylite;
- een deel van het af te voeren aluminium blijft deels in de uitholling achter en vormt een braam aan de tussenlagen en de onderlaag.

De kwaliteit van de snede neemt hierdoor van boven naar beneden af en neemt met toenemende dikte af: de ruwheid neemt toe en de snede aan de onderzijde wordt ongelijkmatiger (figuur 11).

De matige kwaliteit voor grotere diktes van Arall en Glare heeft ertoe geleid dat de optimale snij-instellingen alleen met een gepulste laserbundel worden verkregen. De braamvorming op de tussenlaag kan ook positief uitwerken: Bombal H kan braamvrij worden gesneden en de spleet van 0,05 mm die pasta bevat, wordt overbrugd door binnendringend staal dat in de spleet stolt en de spleet afdicht (figuur 12). Dat kan per definitie niet het geval zijn bij het waterstraalsnijden.

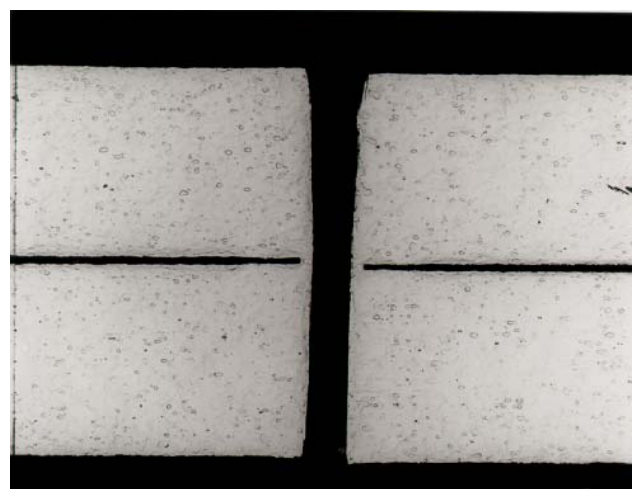
Warmte beïnvloede zone/vervormingszone

Zowel bij het waterstraalsnijden als het lasersnijden wordt het aan de snijkant grenzende materiaal beïnvloed:

- bij waterstraalsnijden wordt een vervormingszone gevonden;
- bij lasersnijden is er een warmte beïnvloede zone.

Uit hardheidsmetingen van water- en laserstraal gesneden Bombal H blijkt dat de vervormingszone maximaal 40 μm en de warmte beïnvloede zone maximaal 80 μm diep is. De warmte beïnvloede zone zal in diepte toenemen bij sterkere braamvorming.

Tabel 9 geeft een indruk van de ruwheid en braamhoogte van laser- en waterstraal gesneden proefstukken van Arall en Glare. De ruwheid is aan de bovenste en onderste aluminiumplaat gemeten.



figuur 12 Lasergesneden Bombal H

tabel 9 Vergelijking van ruwheid en braamhoogte (in μm) van Arall en Glare

ruwheid en braam	lasersnijden	waterstraalsnijden	
		V_{\min}	V_{\max}
R_a bovenzijde	2,6 - 6	3,7 - 4,2	6,2 - 6,8
R_a onderzijde	10 - 27	3,6 - 9,5	7 - 14
braam	20 - 80	9 - 13	6 - 31

Bij lasersnijden is de ruwheid aanzienlijk groter aan de onderzijde en neemt met het aantal laminaatlagen toe. Bij waterstraalsnijden is de ruwheid aan de onderzijde weinig groter dan aan de bovenzijde.

6 Effecten op de materialen

Glare

Glare is door middel van waterstraalsnijden goed te scheiden. Ook met de laserstraal zijn alle onderzochte Glare-soorten te scheiden. De kwaliteit van de snede neemt echter met toenemende dikte af. Het gesmolten aluminium heeft met toenemende dikte de neiging in de snede te blijven hangen. Voor de grotere diktes worden naar beneden toe grotere snedebreedtes geconstateerd.

Voor waterstraalsnijden is de snedebreedte aanzienlijk groter dan voor lasersnijden (0,8 mm ten opzichte van 0,25 mm). Door de snelheid is de snedekwaliteit sterk te beïnvloeden. Bij hoge snelheden is de snede taps en de ruwheid neemt van de straalintreezijde naar de straaluitreezijde toe. Bij een veel lagere snelheid wordt over de gehele snede een nagenoeg gelijke ruwheid gevonden met een braam die minder is dan 0,02 mm.

Arall

De experimenten en de resultaten laten zien dat materialen met zowel lasersnijden als waterstraalsnijden goed te scheiden zijn. Het thermisch effect van het lasersnijden komt duidelijk tot uiting in de sterke aantasting van de kunststofvezelversterkte lagen. De waterstraal maakt qua uiterlijk van de snede weinig onderscheid tussen metaal en tussenlaag en geeft naarmate de snelheid afneemt een meer haakse snede, onafhankelijk van de dikte. De laserstraal heeft meer moeite naarmate de dikte toeneemt. De snedebreedte neemt met toenemende dikte naar beneden toe. De sterkste uitkolking wordt bij soorten met meer dan één tussenlaag in de onderste laag waargenomen.

Bij het waterstraalsnijden wordt gevonden dat naarmate langzamer wordt gesneden, de kwaliteit van de snijkant beter is. In het vervormingsgedrag van laser- en waterstraal gesneden producten is weinig verschil te vinden.

Hylite

De experimenten en de resultaten laten zien dat materialen met zowel lasersnijden als waterstraalsnijden goed te scheiden zijn. Het thermisch effect van het lasersnijden komt zeer expliciet tot uiting in de uitkolking van de kunststof tussenlaag.

Het vervormingsgedrag op de snede is voor beide technieken nagenoeg identiek. Wel komen, zoals te verwachten is, grote verschillen in vervormingsgedrag tot uiting tussen de zachte en de harde soorten.

Bombal H

Het materiaal Bombal H is zowel met een laserstraal braamvrij als met een waterstraal met een geringe braam goed te snijden. De pasta bevattende tussenlaag wordt bij het lasersnijden overbrugd door gesmolten staal, dat de spleet tot 0,05 mm diep afdicht. De geringe grootte van de braam bij het waterstraalsnijden komt ter plaatse van der spleet goed tot uiting, doordat de braam minder dan de spleetbreedte is.

Sandwich-honingraatmaterialen

Zowel bij het lasersnijden als het waterstraalsnijden van de sandwich-honingraatmaterialen zijn geen instellingen gevonden waarmee met een redelijke kwaliteit kon worden gesneden. Het is niet uitgesloten dat verder onderzoek van het waterstraalsnijden tot wellicht een aanvaardbare snedekwaliteit kan voeren, bijvoorbeeld door een uiterst langzame voortloopsnelheid.

Duralcan

Duralcan kan uitstekend door middel van waterstraalsnijden worden gescheiden. Bij het lasersnijden bleek een geringe braamvorming aan de onderzijde van de snede onvermijdelijk. Door toepassing van hogere gasdrukken (> 10 bar) wordt verwacht dat braamvorming nagenoeg geheel kan worden onderdrukt.

Conrock sandwichpanelen

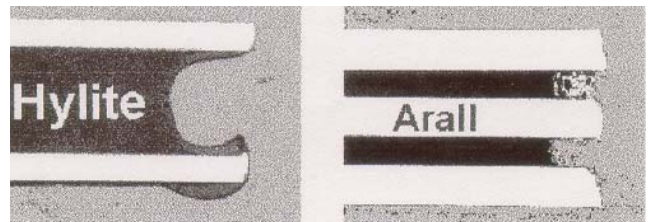
Bij het laser- en waterstraalsnijden divergeert de bundel sterk na het snijden van de bovenplaat, waardoor de vermogensdichtheid te gering is om de minimaal 50 mm lager liggende onderplaat te kunnen snijden.

7 Modelvorming van de snijprocessen

De voorspelbaarheid van het laser- en waterstraalsnijden aan de hand van het opstellen en toetsen van modellen is een onderdeel van het project geweest. Hiermee kan tijd gewonnen worden bij de uiteindelijke keuzes van snijparameters. De verschillende invloeden zijn hierbij aan de orde geweest.

7.1 Lasersnijden

Bombal H gedraagt zich bij het lasersnijden als normaal staal met een vergelijkbare dikte. Arall, Glare en Hylite kunnen als typische laminaatmaterialen worden beschouwd. Met name Hylite en Arall tonen bij het snijden een typische aantasting van de niet-metallische tussenlagen, zoals dat bijvoorbeeld in figuur 13 tot uitdrukking wordt gebracht.



figuur 13 Aantasting van kunststoflagen bij lasersnijden; links: Hylite; rechts: Arall

Door middel van modelvorming is getracht het verschijnsel van de aantasting van de tussenlagen te beschrijven. De modellering is gebaseerd op een door Petring (Ph.D. thesis, RWTH Aachen, 1995) beschreven model, dat het materiaal als een aantal discrete lagen aanneemt. Dit model gaat uit van het lasersnijden met inert gas. In dit model kunnen balansvergelijkingen voor de massa, vermogen en impuls worden opgesteld.

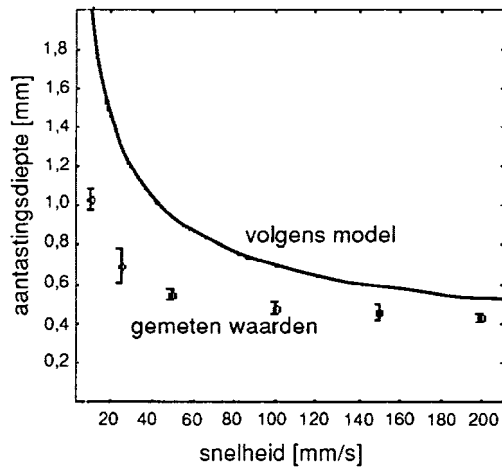
Toepassing door Petring van zijn model op het lasersnijden van metaal geeft bij oplossing van de vergelijkingen een afwijking van het model dat slechts 10% afwijkt van de experimentele resultaten.

Door de aanname van een aantal discrete lagen leent het model zich goed voor laminaatmaterialen. De snederesultaten van de metallische lagen van laminaten konden goed benaderd worden door dit model. Dit kon door de kunststofdelen in het materiaal als "lucht" te modelleren, en elke volgende metaallaag te beschouwen als een nieuw materiaal met een veranderde focuspuntligging. In figuur 14 zijn resultaten weergegeven van de uitkomst van berekeningen en de experimenten.

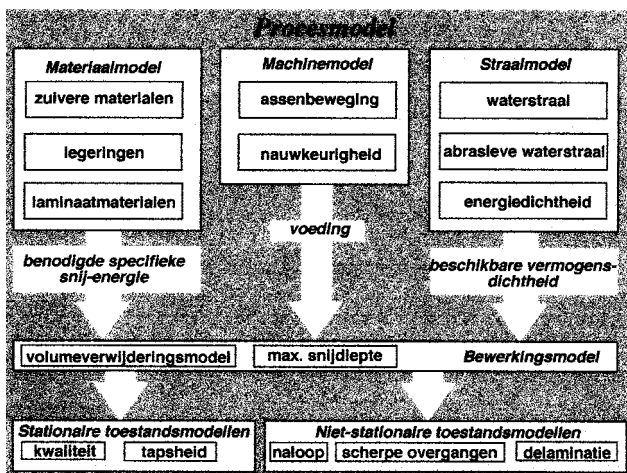
7.2 Waterstraalsnijden

Voor de ontwikkeling van het mathematisch model bij het waterstraalsnijden, dat gebruikt wordt om de waarden van de snijparameters te bepalen, zijn beschikbare modellen voor het abrasieve waterstraalsnijproces geanalyseerd.

Door hun beperkte bruikbaarheid binnen dit onderzoek is er gekozen voor de ontwikkeling van een nieuwe, coherente set van procesmodellen (zie schema in figuur 15). In deze set beschrijven aparte modellen respectievelijk het materiaal, de machine, de straal, het materiaalverwijderingsmechanisme en de snede. De modellen zijn verbonden door parameters, die gebaseerd zijn op de energie-stroom door het systeem. Voorbeelden van deze



figuur 14 Vergelijking experimenten met modelberekeningen



figuur 15 Schema van de modellering

parameters zijn: de beschikbare vermogensdichtheid, de benodigde specifieke snij-energie en de intensiteit van de straal op het werkstuk. Het materiaalmodel is zodanig ontwikkeld, dat, behalve voor specifieke situaties, de karakteristieken van laminaatmaterialen door de andere modellen op dezelfde wijze als homogene materialen gebruikt kunnen worden.

Als voorbeeld is hieronder de resulterende formule voor de maximale snedediepte uit het bewerkingsmodel weer gegeven:

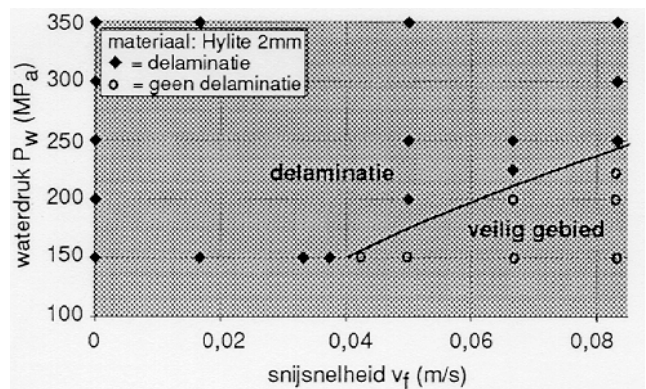
$$h_{\max} = \xi(v_f) \cdot \frac{P_{\text{abr}}}{e_c \cdot d_f \cdot v_f}$$

hierin is:

- h_{\max} [m] de maximale snedediepte;
- $\xi(v_f)$ [-] een correctiefactor waarin de volumeverwijdering, afhankelijk van de snijsnelheid verrekend is;
- P_{abr} [W] het beschikbare vermogen van de abrasieve waterstraal;
- e_c [J/m³] een materiaalparameter, die de benodigde specifieke snij-energie aangeeft;
- d_f [m] de diameter van de abrasieve waterstraal;
- v_f [m/s] de voedingssnelheid.

Vanuit dit "basismodel" zijn materiaal en geometrie specifieke submodellen voor de snede ontwikkeld. Hieronder vallen modellen die het delamineren van laminaatmaterialen, de tapsheid van het product, de "neus"-vorming aan het eind van een snede en de nauwkeurigheid van het werkstuk op de overgangen van de ene snede naar de andere beschrijven. Een voorbeeld van de uitkomst van het model bij het voorspellen van delaminatie van

Hylite 2 mm is weergegeven in figuur 16. De "gesloten ruitjes" geven testomstandigheden aan waarbij delaminatie optrad, bij de "open rondjes" daarentegen trad geen delaminatie op. De getrokken lijn geeft de voorspelling van het ontwikkelde model van de grens tussen de snijparameter gebieden waar wel of geen delaminatie optreedt.



figuur 16 Verificatie van het model op het materiaal Hylite

Uit verificatie is gebleken, dat het model voor uiteenlopende werkstukmaterialen en snijcondities in staat is de eigenschappen van de resulterende snede te voorspellen met een nauwkeurigheid, die het model bruikbaar maakt voor toepassing binnen een werkvoorbereidingsomgeving.

8 Modificaties van de snijkoppen

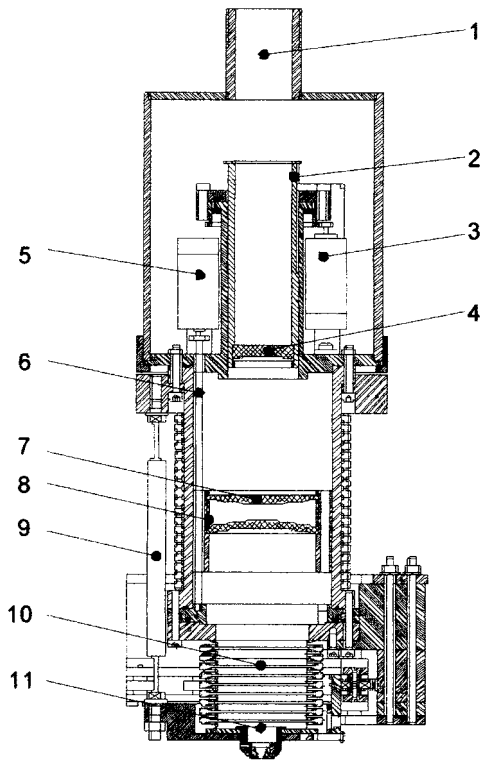
Een deel van het onderzoek is op de verbetering van de systemen gericht geweest. Dat geldt zowel voor lasers als voor waterstraalsnijden. De experimenten hadden tot doel een betere kwaliteit in combinatie met een groter procesrendement te verkrijgen. Bij het lasersnijden is het voorlopige resultaat dat in ieder geval met minder gas bij een gelijke kwaliteit gesneden kan worden. De modificatie van de snijkop bij het waterstraalsnijden heeft tot een duidelijk gunstiger bedrijfsvoering geleid.

Op het gebied van de verbetering van snijkoppen ligt een geheel terrein braak. Dit geldt zeker ook voor het lasersnijden. Recente Deense ontwikkelingen met "dual-focus" lenzen laten zien dat er optisch winst te behalen is. De ontwikkelingen bij de Universiteit Twente op optisch gebied tonen aan dat o.a. voor het oppervlaktebehandelen de kwaliteit van de door hen ontwikkelde bundel superieur is aan die verkregen met de gebruikelijke oplossingen. Ook voor het lasersnijden is zo'n ontwikkeling uitgevoerd. Voor het waterstraalsnijden zijn door de TU-Delft eveneens verbeteringen aan de snijkop uitgevoerd.

8.1 Modificaties van de lasersnijkop

In de standaard lasersnijkop wordt de laserbundel met een objectieflens gefocuseerd. De bundel valt via de uitstroombopening op het te snijden werkstuk, waarbij hartlijn van laserbundel en uitstroombopening samenvallen.

Voor de CO₂-lasersystemen is een nieuwe snijkop ontwikkeld, die de brandpuntsafstand en de uitlijning van gasstroom en laserstraal continu kan variëren. Van beide parameters wordt een substantiële invloed op de procesvoortgang verwacht. In figuur 17 is de snijkop te zien: met een negatieve lens (4) wordt de laserbundel eerst gedivergeerd, waarna twee positieve lenzen de straal weer focussen. Door de onderlinge afstand tussen de negatieve en de twee positieve lenzen (7) te variëren, kan men de effectieve brandpuntsafstand variëren, en daarmee de grootte van de gefocuseerde spot, alsmede de scherptediepte van de focus. De uitstroombopening (11) is beweegbaar in het x-y vlak, waardoor een zekere excentriciteit van de gasstraal ten opzichte van de laserstraal kan worden bereikt.



figuur 17 De nieuw ontwikkelde flexibele lasersnijkop met een variabele brandpuntsafstand van 60 - 170 mm. 1 = inkoppelpunt laserbundel; 2 = lenshouder negatieve lens; 3 = motor negatieve lens; 4 = negatieve lens; 5 = motor positieve lens; 6 = lange as; 7 = doublet positieve lenzen; 8 = lenshouder positieve lenzen; 9 = rechgeleiding; 10 = balg; 11 = mondstuk

De eerste experimenten hebben nog niet tot hogere snij-snelheden en/of een verbeterde snedekwaliteit geleid. Wel blijkt dat bij gelijkblijvende snedekwaliteit met veel minder snijgas kan worden gesneden. De maximale gasdruk (8 bar) vormt op dit moment een beperking. De toegepaste gasdruk bij het snijden met de standaardkop van de verschillende laminaatmaterialen varieerde tussen 10 en 20 bar.

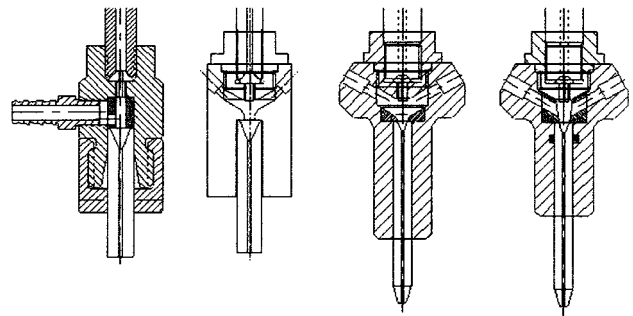
8.2 Modificaties van de waterstraalsnijkop

In eerste instantie zijn alle snijproeven uitgevoerd met een standaard snijkop. In een aantal stappen is het ontwerp van de snijkop herzien om tot betere snijresultaten te komen. Deze aanpassingen concentreerden zich op een betere toevoer en menging van het abrasief in de mengkamer en een betere, eenvoudigere en gewaarborgde uitlijning van de focusseerbuis met het waterstraalmondstuk.

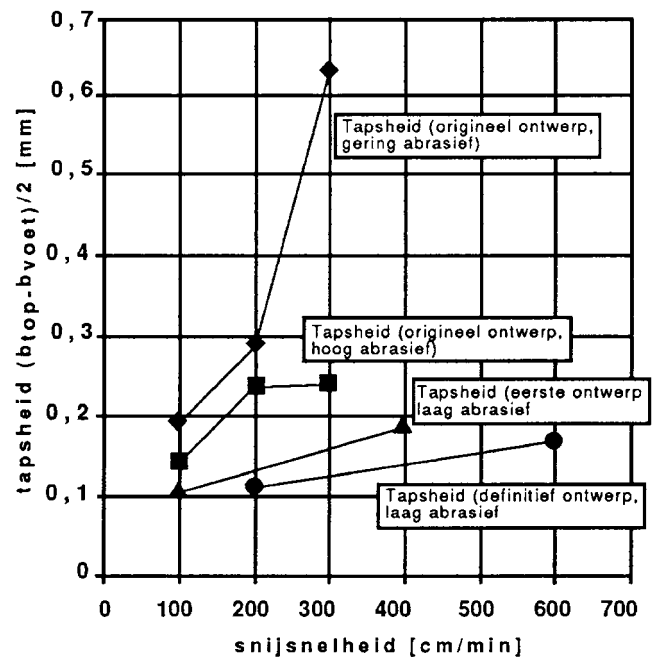
Een overzicht van deze ontwikkeling is te zien in figuur 18 met geheel links de ontwerp-tekening van de oorspronkelijke snijkop en geheel rechts het definitieve ontwerp.

In het definitieve ontwerp wordt het abrasief van 2 zijden toegevoerd en vermengd met de waterstraal in de mengkamer, die steile wanden en geen dode zones bevat. Ter evaluatie van de nieuwe snijkop zijn een aantal snijproeven met deze en de oorspronkelijke snijkop uitgevoerd. De resultaten worden in figuur 19 weergegeven.

Uit figuur 19 blijkt dat de maximale voedingsnelheid waarmee kan worden gesneden, flink is toegenomen. Hierbij is tegelijkertijd de tapsheid (het verschil in snedebreedte aan de boven- en onderzijde van de snede) afgenomen. Tevens is de benodigde hoeveelheid abrasief afgenomen. Dit is vooral te danken aan een diameterreductie van 1,1 mm



figuur 18 Ontwikkeling van waterstraalsnijkop



figuur 19 Vergelijking van waterstraalsnijproeven op Glare-5 lagen met de originele en nieuw ontworpen snijkop

van de straal tot 0,76 mm en door de betere abrasief-toevoer en menging in de vernieuwde snijkop.

9 Conclusies

Laser- en waterstraalsnijden hebben zich beide bewezen als belangrijke scheidingsprocessen, die naast én in plaats van de andere scheidingsprocessen kunnen voorkomen. De grootste toepassingsgebieden van het lasersnijden zijn plaatmaterialen en profielen van staal, roestvast staal, aluminium en diverse niet-metallische materialen, zoals hout en kunststof.

Het toepassingsgebied voor waterstraalsnijden ligt bij de materialen, die niet of moeilijk met de laser te snijden zijn, zoals diverse kunststoffen, gecoate materialen, dikke materialen en hoogreflectieve metalen als koper, messing en aluminium. Een ander toepassingsgebied ligt bij materialen waar de snijkant niet thermisch mag worden belast. Het diktebereik voor waterstraalsnijden is aanzienlijk groter dan voor lasersnijden.

Laminaten en hybride materialen nemen sterk in betekenis toe door de synergie van gunstige eigenschappen, die door combinatie van verschillende materialen in één samengesteld materiaal kunnen worden verkregen. In tabel 10 wordt de beoordeling aangegeven van de toepassing van het laser- en waterstraalsnijden op de onderzochte materialen.

Het waterstraalsnijden scoort bij 7 materiaalcombinaties goed en bij het lasersnijden van die materialen redelijk tot goed. Alleen de steenwolpanelen geven voor beide processen een ongewenst resultaat en dat geldt ook voor het lasersnijden van sandwichpanelen.

Delaminatie is bij het snijden niet gevonden. Door een goede procedure bij het maken van een startgat bij het waterstraalsnijden kan delaminatie volledig worden voorkomen. Bij lasersnijden wordt veelal bij inwendige contouren het startgat in het restmateriaal gemaakt en wordt vloeiend de te snijden contour benaderd.

Met het doel het snijproces te verbeteren zijn zowel voor het lasersnijden als het waterstraalsnijden veranderingen in het ontwerp van de respectievelijke snijkoppen doorgevoerd. Uit de eerste experimenten met de vernieuwde laserkop is gebleken dat met veel minder gas met gelijkblijvende snedekwaliteit kan worden gesneden. Op dit moment vormt de maximaal toelaatbare druk (8 bar) in de nieuwe kop een beperking voor het snijden van aluminium en roestvast staal. Bij de waterstraalkop hebben de aanpassingen er onder andere toe geleid dat bij gelijkblijvende snedekwaliteit 20 - 40% sneller kan worden gesneden.

De verschillen en overeenkomsten tussen laser- en waterstraalsnijden worden in tabel 11 nogmaals kort samengevat.

Nagenoeg alle materialen kunnen met abrasief waterstraalsnijden tot grote diktes worden gesneden. De kwaliteit (snede-

vorm, snedebreedte en ruwheid) is snelheidsafhankelijk, maar weinig afhankelijk van soort en dikte. Gebleken is dat ruwheidswaarden (Ra) van 4 µm kunnen worden bereikt.

Materialen tot enige mm's dikte kunnen sneller met de laser worden gesneden. De kwaliteit is voor de dunste materialen ongeveer gelijk aan wat met waterstraalsnijden kan worden bereikt. Voor dikkere materialen neemt bij het lasersnijden braamvorming en ruwheid in het onderste deel van de snede toe en zijn de optimale snij-instellingen kritisch. De warmte beïnvloedt de zone bij het lasersnijden en de vervormingszone bij het waterstraalsnijden zijn klein.

10 Referenties

1. Eindrapport "Laser- en Waterstraalsnijden van Hybride Plaatmaterialen"; IOP-Metalenproject C94.716.UT.WB, 1999, ed. J.Meijer.
2. Proefschrift A.M. Hoogstrate, juni 2000, "Towards High-Definition Abrasive Waterjet Cutting", Universiteit Delft.
3. VM 114, Scheidingstechnieken voor Metalen, FME-CWM, okt. 1998
4. VM 80, Laserbewerkingen, FME, dec. 1988
5. Hogedruk abrasiefwaterstraalsnijden in bedrijf; A.M.Hoogstrate, Materialen 5, sept/okt 1999, p.8 - 12
6. Laser- en waterstraalsnijden van gelamineerde en beklede plaat; W. Husslage, J. Meijer, D. van der Torre, Materialen 6, nov/dec 1999, p. 7 - 13.

tabel 10 Beoordeling van het laser- en waterstraalsnijden op de onderzochte materialen

materiaal	lasersnijden				waterstraalsnijden			
	goed	redelijk	matig	niet	goed	redelijk	matig	niet
Hylite	■				■			
Arall 3 - 5 lagen	■				■			
Arall 7 - 11 lagen		■			■			
Glare 3 lagen	■				■			
Glare 5 - 9 lagen		■			■			
Bombal H	■				■			
Sandwich/honinggraat				■			■	
Duralcan		■			■			
Conrock 50 - 150 mm panelen				■				■

tabel 11 Verschillen en overeenkomsten tussen laser- en waterstraalsnijden

eigenschappen	lasersnijden	waterstraalsnijden
soort proces	thermisch	mechanisch
randzone	warmte beïnvloede zone	vervormingszone
grootte randzone	< 0,2 mm	< 0,1 mm
snede uiterlijk	haakse snede uitkolkings: Hylite, Arall	haakse tot conische snede tapsheid afhankelijk van snelheid
ruwheid en braam	materiaalafhankelijk	weinig materiaalafhankelijk
delaminatie	nee	nee, mits goede insteekprocedure
bewerkingssnelheid: max. kwaliteit max. snelheid	laser > water laser < water	water < laser water > laser
snedekwaliteit	materiaalafhankelijk, laser kan beter dan water	weinig materiaalafhankelijk, afhankelijk van snelheid
snedebreedte	< 0,25 mm	afhankelijk van snelheid: boven: 0,7 - 0,85 mm onder: 0,3 - 0,65 mm
nieuwe snijkop	minder gasverbruik	- betere focussering - grotere snelheid - scherpere inloop snijrand

BIJLAGE

Overzicht scheidingstechnieken

(Deze gegevens zijn ontleend aan de FME-CWM voorlichtingspublicatie VM 114 'Scheidingstechnieken voor metalen')

tabel B1 Korte karakterisering van de belangrijkste scheidingstechnieken voor het snijden van metaalplaat

scheidings-techniek	scheidings-principe	toepassingsgebied		snelheid	systeem-uitvoering	belangrijkste plus- en minpunten	investering
		materialen/dikte	product-vorm				
knippen	mechanisch: langs elkaar bewegende messen	alle metalen; 0,2 - 10 mm	plaat	1 kniplengte/slag 1-60 slagen/min	C-frame pers met tafel	+ grote lengten - smalle stroken - bramen	10.000-200.000
slitten	mechanisch: langs elkaar draaiende messen	alle metalen; 0,2 - 3 mm	plaat; vooral van coil	< 200 m/min	ronddraaiende assen met messen	+ zeer grote lengten - niet flexibel - bramen	25.000-200.000
ponsen	mechanisch: met ponsstempel	alle metalen; 0,2 - 10 mm	plaat; beperkt: profielen	< 2000 slagen/min	gereedschap op pers	+ massafabricage + complete contour + kleine producten - niet flexibel - bramen	50.000-650.000
nibbelen	mechanisch: overlappend ponsen	alle metalen; 0,2 - 10 mm	plaat	< 1000 slagen/min; < 5 m/min	pers met gereedschaps-wisselenheid en plaat-positionering	+ flexibel + kleinserie + contourvrijheid - lawaai - bramen - contour gekarteld	50.000-650.000
waterstraal	mechanisch: hogedruk waterstraal die abrasief bevat	alle metalen; 1 - 100 mm	plaat; profielen; 3D-plaat-delen	0,05 - 5 m/min	portaalstelsysteem knikarmrobot	+ flexibel + kleinserie + contourvrijheid + geen wbz - lawaai - geringe braam	300.000-750.000
autogeen	thermisch: acetyleenvlam	on- en laaggeleerd staal; 3 - zeer dik (1000 mm)	plaat; profielen; 3D-plaat-delen	0,1 - 3 m/min	handmatig; diverse systeem-uitvoeringen	+ grote diktes + flexibel - dunne plaat - wbz - voorwarmen	10.000-100.000
plasma	thermisch: plasmaboog met gasondersteuning	alle elektr. geleidende metalen; 1 - 25 mm	plaat; profielen; 3D-plaat-delen	0,1 - 10 m/min	handmatig; diverse systeem-uitvoeringen	+ flexibel + contourvrijheid - conische snede of één zijde haaks - wbz - materiaal met niet-geleidende deklaag	25.000-300.000
laser	thermisch: gefocusseerde laserbundel met O ₂ of inert gas	alle metalen; < 20 mm	plaat; profielen; 3D-plaat-delen	0,5 - 12 m/min	C-frame; portaalstelsysteem; knikarmrobot; hybride systeem	+ zeer flexibel + enkelstuks - kleinserie + snel + snedekwaliteit + geen nabewerking - kleine wbz	400.000-1.000.000

tabel B2 Scheidingstechniek: productvorm, nauwkeurigheid, proces- en systeemgegevens

scheidings-techniek	halfafrikaat			contour		maat-nauwkeurigheid [mm]	dam-breedte (t = plaat-dikte)	scherpte hoek	radius [mm]	hulpmiddelen			snedekwaliteit				
	plaat	profiel	3-D	vorm	opm.					gereedschap-pen	gassen	overige	snede-breedte [mm]	braam	ruwheid R _a	haaksheid	wbz
knippen	+	+/-	-	recht		0,1	20t	30°	n.v.t.	rechte messen	geen		n.v.t.	> 20µm	> 20µm	redelijk	n.v.t.
slitten	+	-	-	recht		0,1	20t	n.v.t.	n.v.t.	ronde messen	geen		n.v.t.	> 20µm	> 20µm	redelijk	n.v.t.
ponsen	+	+/-	-	+	gelijk stempel-vorm	0,1	t	60°	0,5	stem-pels	geen		n.v.t.	> 20µm	> 20µm	redelijk	n.v.t.
nibbelen	+	-	-	+	gekarteld	0,1	t	30°	0,5	stem-pels	geen		n.v.t.	> 20µm	> 20µm	redelijk	n.v.t.
waterstraal-snijden	+	+	+	+		0,1	t	30°	0,5-1	snijkop	geen	abrasief	0,5-2	20µm	2-20µm	> 80° geringe inloop	n.v.t.
autogeen snijden	+	+	+	+		0,5	5t	> 90°	1-2	snijkop	acetyleen O ₂		> 2	> 50µm	> 10µm	haaks	> 2 mm
plasma-snijden	+	+	+	+		0,2	2t	90°	0,5-1	snijkop	Ar, H ₂ , N ₂ , lucht		> 0,5	> 20µm	> 10µm	haaks, conisch	> 1 mm
lasersnijden	+	+	+	+		0,05	0,5t	15°	0,1-0,2	snijkop	O ₂ , N ₂ , lucht		0,1-0,4	geen, zeer gering	2-10µm	> 88°	> 0,05 mm

