

Nieuwe bewerkings verbeteren

Het microbewerken van metaal, kunststof, glas en keramiek was het onderwerp van een themadag op 28 oktober in het Mikrocentrum in Eindhoven. Daarbij bleek weer eens dat klassieke bewerkingstechnieken als frezen en draaien hun grenzen nog niet hebben bereikt. Maar ook op het gebied van het bewerken met lasers zijn precisietechnologen nog niet aan het eind van hun latijn. Microsysteemtechnologie komt steeds meer van de grond omdat er zich nieuwe toepassingen aandienen. En microbewerken draagt bij aan de acceptatie van producten doordat hun oppervlak de gebruiker een 'fijner gevoel' geeft, zoals velen van ons iedere dag ervaren als ze het stuur van hun auto vastpakken.

• Frans Zuurveen •

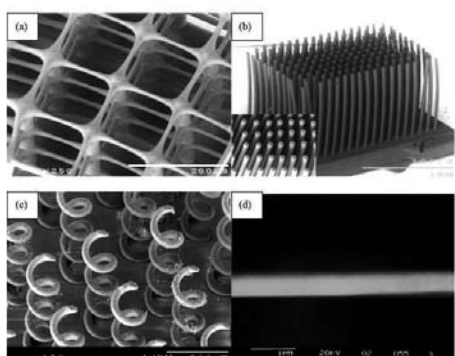
Dagvoorzitter Lou Hulst legt na een welkomstwoord van Mirjam van Praag van het Mikrocentrum nog eens uit wat de belangrijkste thema's van het IOP Precisietechnologie zijn: snel en nauwkeurig positioneren, mechatronisch ontwerpen, precisiebewerken en microsysteemtechnologie (MST) en MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Op de gebieden mechatronica en MEMS loopt Nederland beslist niet achter, maar helaas krijgt bewerkingstechnologie steeds minder aandacht in onderzoek en onderwijs. Met name van de universiteiten komen binnenkort geen afgestudeerde of gepromoveerde technologen meer op de arbeidsmarkt. Er is wel kennis bij individuele bedrijven, maar die is veelal afgeschermd voor derden. Er staat een nieuwe roadmap precisietechnologie op stapel, die onder meer aan dit probleem aandacht besteedt. Gelukkig is het onderzoek bij TNO, ECN en IPT Aken openbaar en dat blijkt ook weer op deze themadag.

Productietechnologie en -strategie

Johan Bosman van ECN Engineering en Services laat zien welke strategieën er nodig zijn om microbewerkingen geschikt te maken voor een macrowereld. Naarmate de afmetingen van producten afnemen, wordt de relatieve nauwkeurigheid geringer: van 0,001% in reusachtige graafmachines naar 5% in IC's. Hij bespreekt, vooruitlopend op de andere sprekers, de problemen die optreden als bewerkingen doordringen in het 'microgebied'.

Bij microvormen worden door wrijving de krachten onevenredig groter. Lokaal verwarmen met een laser kan uiterst dunne folies gemakkelijker vervormbaar maken. Micro-vonkverspanen gaat langzamer maar nauwkeurigheid en gladheid nemen toe. Over micro-elektrochemisch bewerken wordt veel gepubliceerd, maar er zijn weinig toepassingen. Stereolithografie, zie Afbeelding 1, is interes-

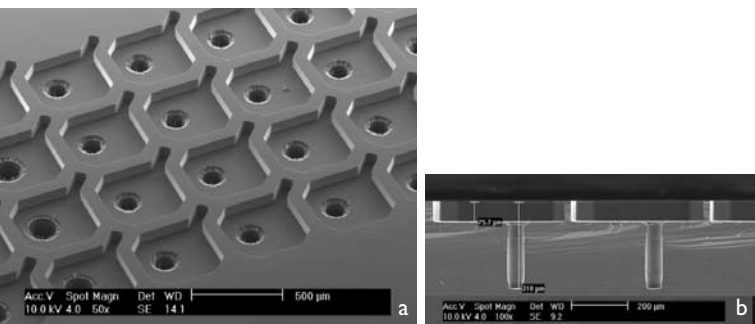
technieken oppervlakken



Afbeelding 1. Voorbeelden van stereolithografie.
(Foto's: C. Sun, University of California)

sant, maar kunnen er straks ook metalen microproducten worden gemaakt? Tandwieloverbrengingen in MEMS lijken door de moeilijke integratie in één product nog verre toekomstmuziek. Interfacing van micro in macro – verpakken, aansluiten, krachtoverdracht en assembleren – is een onderschat probleem, dat grotendeels nog moet worden opgelost.

In het algemeen geldt dat bij microbewerken snelheid ten koste gaat van de stabiliteit, integratie de voorkeur heeft boven assemblage, direct meten te prefereren is boven selecteren en dat regelen en besturen van bewegingen onontkoombaar is.



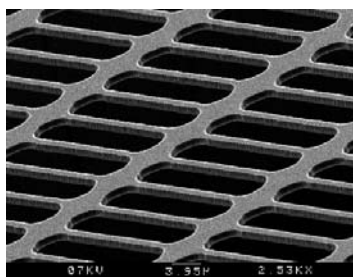
Afbeelding 2. Silicium-spuitkopjes met gaten met hoge diepte-breedteverhouding voor inkjetprinters, gemaakt in MiPlaza.

- a) Bovenaanzicht.
- b) Doorsnede; de onderste laag silicium wordt weggeslepen.

MiPlaza helpt MEMS-gebruikers

MiPlaza is een ontwerp- en productiedienstverlener op de High Tech Campus Eindhoven. Frank Dirne vertelt dat MiPlaza niet alleen voor Philips Research werkt, maar voor 30% voor partijen buiten Philips. Daarbij wordt de klant langs de gehele keten van idee tot product geholpen. MiPlaza beschikt onder meer over een van de grootste research-cleanrooms ter wereld voor microstelsel- en dunnefilmtechnologie: 2.650 m².

Een product doorloopt meestal diverse cycli van depositie, belichten, etsen en controle, tot de gewenste opbouw is bereikt. Voorbeelden zijn silicium-spuitkopjes met gaten met een extreem hoge diepte-breedteverhouding voor inkjetprinters, zie Afbeelding 2, diafragma's van silicium-nitride voor elektronenmicroscopen, microfilters van siliciumnitride voor het uitzeven van bacteriën, zie Afbeelding 3, en kanalen in SiO₂ voor micro-fluidica.



Afbeelding 3. MiPlaza maakt ook micro-filters van SiN voor het uitzeven van bacteriën.

Een ander interessant toepassingsvoorbeeld van dunnefilmtechnologie is polymeerelektronica op folie. Dit soort toepassingen vereist processen die meestal niet standaard beschikbaar zijn in conventionele IC-productiefaciliteiten. Te denken valt hierbij aan het uiterst precies uitlijnen van de belichtingen aan onder- en bovenzijde van het substraat. Daarvoor beschikt MiPlaza over een ASML-stepper met een speciale optie, 3D-Align.

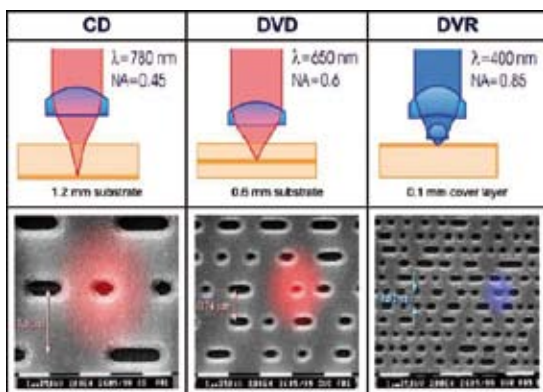
Prototypes voor optica

De Enabling Technologies Group in Eindhoven – vroeger Philips Machinefabrieken – is tegenwoordig onderdeel van de VDL Groep. Mathieu Breukers herinnert aan de rijke

historie van Philips Machinefabrieken op het gebied van precisietechnologie, bijvoorbeeld voor het draaien van poolschoenen voor elektronenmicroscopen met een tolerantie van minder dan een micrometer. Op het ogenblik heeft ETG op het Campus Technology Centre een afdeling Ultra Precision Technology met de disciplines draaien, fly-cutting en frezen. Voor draaien heeft deze afdeling machines ter beschikking die door of met ondersteuning van Philips Research zijn ontwikkeld, zoals de Colath en de Optomatic. De meeste machines hebben een luchtgelagerde spil en hydraulische geleidingen. Waar nodig ontwerpt en maakt ETG nog steeds eigen bewerkingsmachines.

Vrije-vormoppervlakken voor optische toepassingen met toleranties van enkele tientallen nanometers vormen een ultieme uitdaging. Daarvoor heeft ETG een zogeheten Long Range Tool Servo ter beschikking met een slag van 2,7 mm en een resolutie van 1 nm, aangestuurd door speciale CNC-software. De laatste investering is een vijfassige freesmachine voor fly-cutting en high-speed frezen met een meetsysteem met een resolutie van 1 nm.

Natuurlijk is ultraprecies bewerken onmogelijk als er niet ultranauwkeurig gemeten kan worden. Daarvoor heeft ETG de beschikking over enkele – zelf ontworpen – profilmeters met resolutie van 1 nm. Een Zeiss coördinatenmeetmachine UPMC 850 Carat biedt binnen een bereik van 850 bij 700 bij 600 mm een gegarandeerde nauwkeurigheid van $0,8 + L/600 \mu\text{m}$, met L in mm.



Abbeelding 4. Afname van de afmetingen van de putjes in de opeenvolgende informatiedragers CD, DVD en DVR. Met λ de golflengte van de lichtbron en NA de numerieke apertuur van de optiek.

Tot slot geeft Breukers een aantal voorbeelden van optische componenten. De zware eisen die daaraan worden gesteld, zijn beter te begrijpen door de uitleg over de afmetingen van de putjes in de opeenvolgende informatiedragers CD, DVD en DVR, zie Afbeelding 4. De afmetingen zijn van 150 nm naar 50 nm gegaan en de geëiste oppervlaktekwaliteit R_a van 5 naar 2 nm. Bij deze hoge nauwkeurigheden van optische onderdelen gaan ook afwijkingen een rol spelen die te wijten zijn aan de verschillende banen van de beitel en de taster waarmee het werkstuk wordt gemeten. ETG heeft software ontwikkeld om die fouten voor een belangrijk deel in rekening te brengen.

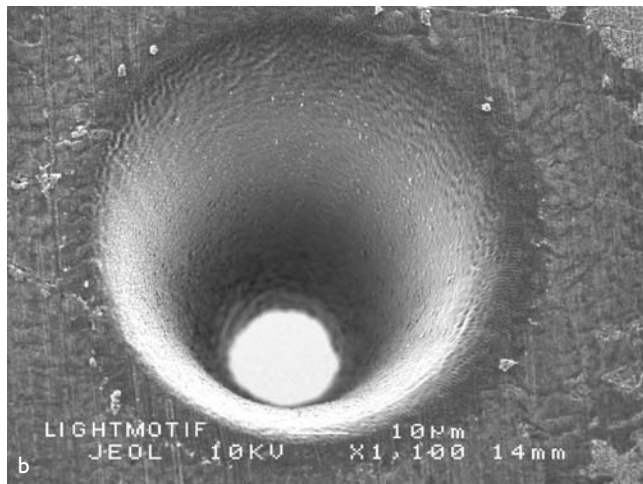
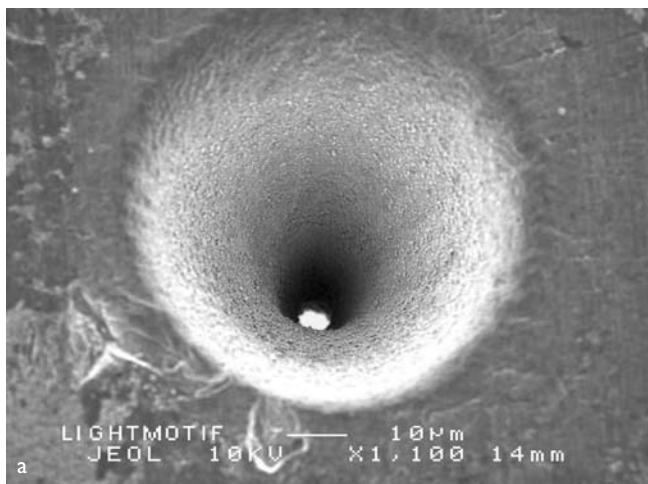
Ultrakorte laserpulsen

Lightmotif is een jonge firma, dit jaar opgericht om de voordelen van het bewerken met ultrasnel gepulste lasers commercieel te benutten. Max Groenendijk legt uit dat de nieuwste precisietoepassingen van lasers te vinden zijn in het gebied van een vermogensdichtheid tot 10^{15} W/cm^2 , samen met een uiterst korte interactietijd van 10^{-12} tot 10^{-15} seconde, oftewel 1 ps (picoseconde) tot 1 fs (femtoseconde). Het grote voordeel van deze korte interactietijden is dat zeer lokaal al materiaal is gesmolten en verdampt voordat het omliggende materiaal door warmtegeleiding wordt beïnvloed.

Voor het genereren van fs-laserpulsen wordt uitgegaan van de modelocking-techniek. Daarbij ontstaat door een vast faseverschil tussen de diverse trillingsmodes na interferentie een trein van laserpulsen, in dit geval met een herhaalfrequentie van 250 kHz en een pulslengte van 200 fs, bij een golflengte van 800 nm.

Lightmotif heeft proeven gedaan met een fs-laser met een vermogen van 1 W en een ps-laser met een vermogen van 10 W. Met de laatste kan materiaal met een tien keer hogere snelheid worden verwijderd, $0,03 \text{ mm}^3/\text{s}$. De ruwheid van het bewerkte oppervlak wordt echter wel groter; in het object van roestvast staal werd $0,8 \mu\text{m } R_a$ gemeten tegen $0,2 \mu\text{m } R_a$ voor de fs-laser. Groenendijk laat een aantal bewerkingsvoorbeelden zien, waaronder het maken van gaten in metaalfolie van $100 \mu\text{m}$; zie Afbeelding 5.

Groenendijk legt verder uit dat het dankzij het multifotonen-effect mogelijk is materiaal inwendig te bewerken zonder dat de structuur aan de oppervlakte verandert. Daarvoor moet het materiaal transparant zijn voor de gebruikte IR-



Afbeelding 5. Gaten door Lightmotif met een ultrasnel gepulste laser gemaakt in metaalfolie van 100 µm dikte.

a) 8 µm diameter.

b) 16 µm diameter.

straling en moeten meerdere fotonen dieper in het bulkmateriaal gelijktijdig één elektron raken en zo de materiaalstructuur ter plaatse beïnvloeden. Lightmotif is er voorts met ultrakorte laserpulsen in geslaagd het oppervlak van lotusbloembladeren te imiteren, waardoor een werkstuk zowel waterafstotend als zelfreinigend wordt. Zie ook het artikel in Mikroniek 2007, nr. 6.

Kunststofoppervlakken verfijnen

Standex International GmbH in Krefeld is gespecialiseerd in het aanbrengen van texturen in matrijzen voor kunststof. Rolf Backes legt uit dat er onderscheid moet worden gemaakt tussen ‘koude’ en ‘warme’ oppervlakken van kunststofproducten. Een koud product voldoet aan de technische specificaties als afmetingen en functies, maar voelt door de gladheid van het oppervlak koud aan. Een warm product draagt door de oppervlaktestructuur bij aan het gevoel van welbevinden van de gebruiker via zijn tast- en kijkzin. Voor het omzetten van een ‘koud’ in een ‘warm’ product door extra texturatie nemen de totale matrijskosten met 2 tot 4% toe.

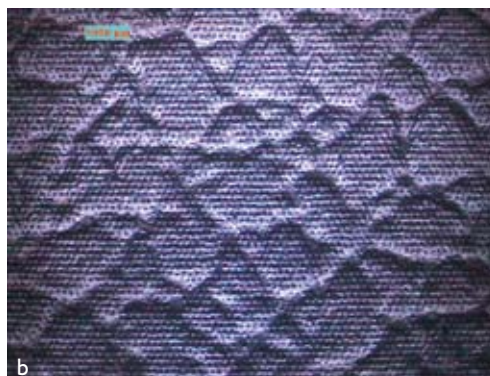
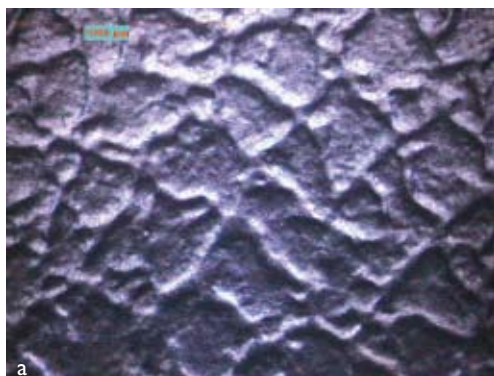
Het voorgaande betekent dat het gladde oppervlak van producten – wat Standex betreft vooral voor inbouw in auto’s

– moet worden getextureerd en gematteerd. Daarvoor wordt het product meestal geëtst, waarbij de oppervlakte toeneemt en er meer licht wordt geabsorbeerd zodat het oppervlak een mat uiterlijk verkrijgt. Omdat zulke processen niet voldoende reproduceerbaar zijn, nemen producenten van kunststofproducten vaak hun toevlucht tot lakken, maar dat is duur en maakt het oppervlak minder krasvast.

Standex heeft een methode ontwikkeld om een grove structuur te combineren met een fijne structuur in de vorm van een soort virtuele micromat. Daarbij wordt een proces toegepast dat lijkt op de lithografische processen voor het maken van IC’s. In de matrijs wordt een lichtgevoelige laag aangebracht die lokaal wordt belicht en ontwikkeld, waarna een etsvloeistof plaatselijk materiaal verwijdert. Standex is er zo in geslaagd een fijne matachtige structuur op een grovere structuur (bijvoorbeeld leerachtig) te superponeren; zie Afbeelding 6.

Microstructuren verbeteren energie-opwekking

Jaco Saurwalt, manager Engineering en Services bij ECN in Petten, vertelt hoe belangrijk het is om nieuwe technologieën te ontwikkelen om zuiniger om te gaan met energie.



Afbeelding 6. Een door Standex getextureerd matrijsoppervlak.

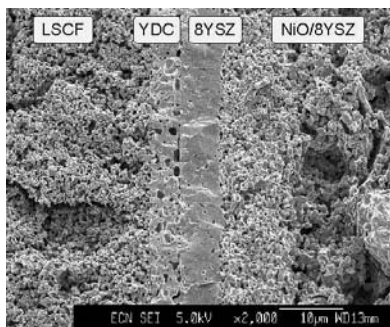
a) Zonder micromat.

b) Met een op de basistextuur gesuperponeerde micromat.

In de procesindustrie wordt 80% van de primaire energie gebruikt om warmte op te wekken, dus is het de moeite waard de rendementen van warmtewisselaars en dergelijke te verbeteren. Daar probeert ECN een substantiële bijdrage aan te leveren. Saurwalt legt uit dat daarbij microstructuren steeds belangrijker worden.

In een microreactor worden vaak een warmtewisselaar, een menger en een katalysator geïntegreerd. Saurwalt beschrijft een reactor voor het reduceren van het CO-gehalte in waterstof van 7500 tot 100 ppm met behulp van een coating met een katalysator. Hierdoor wordt het gas geschikt om in een PEM-brandstofcel (Proton Exchange Membrane) te worden gebruikt. Bij microreactoren is de absolute nauwkeurigheid van de lagen niet altijd hoog, maar is de afwerking van de randen bepalend voor het stromingsgedrag.

Aan de hand van een keramische anode-gedragen brandstofcel wordt het samenstellen van structuren zonder nabewerking getoond. Bij een brandstofcel met zirconiumoxide-ionengeleider is zowel de kostprijs als de hoge bedrijfstemperatuur van 800 °C een probleem. Een oplossing kan bestaan uit het aanbrengen van een kathode van LSFC – lantaanstrontiumkobalt-ferriet – op een 5 µm dikke laag ZrO op een dragende dikke anodelaag van nikkelcomposiet. Het is een uitdaging zo'n samengesteld systeem van materialen met verschillende uitzettingscoëfficiënt te maken zonder dat het kromtrekt; zie Afbeelding 7. ECN is erin geslaagd de vlakheidsafwijking tot 10 µm of minder te reduceren.



Afbeelding 7. SEM-opname van een bij ECN gerealiseerde, zeer gecompliceerde lagenstructuur voor een keramische anode-gedragen brandstofcel.

ECN doet ook onderzoek naar het efficiënt produceren van flexibele zonnecellen. Die bestaan uit dunne p- en n-gedooteerde lagen Si aan weerskanten van een dikkere Si-laag. Daarvoor heeft ECN onlangs een PECVD-machine (Plas-

ma-Enhanced Chemical Vapour Deposition) in gebruik genomen, waarin de lagen op basis van silaangas (SiH_4) op een substraat worden gedeponerd. Hierbij is het van wezenlijk belang dat in één of meer lagen groeven kunnen worden aangebracht met het doel gebieden van elkaar te isoleren. Daarvan geeft Saurwalt een aantal voorbeelden in de vorm van bewerkingen met lasers.

Optische oppervlakken

Vlakke en bolle optische oppervlakken zijn van oudsher met hoge nauwkeurigheid te maken door producten te polijsten en te leppen. Guido Gubbels van TNO Industrie en Techniek in Delft legt uit hoe deze klassieke technieken moeten worden gemodificeerd om optische vrije-vormoppervlakken te kunnen vervaardigen.

Vrije-vormoppervlakken worden bij TNO bewerkt op een diamant-draaibank Precitech Nanoform 350, die een vormnauwkeurigheid van 100 nm per 100 mm kan bereiken. De machine is uitgerust met een on-machine-meetsysteem. Om de gewenste optische kwaliteit te bereiken, is na de draai-bewerking in 99% van de gevallen geen polijstbewerking meer nodig.

Bij klassiek polijsten en leppen wordt het gehele oppervlak door het polijstmiddel bewerkt. Maar bij vrije-vormoppervlakken moet er juist lokaal op de 'hoge punten' materiaal worden weggenomen. Dat wordt deterministisch polijsten genoemd, dat het klassieke, vakmanschap-gebonden handpolijsten aanvult. Voor deterministisch polijsten maakt TNO gebruik van een Zeeko FJP600-machine, die op twee manieren lokaal materiaal kan verwijderen: met zogeheten 'bonnet polishing' (polijsten met gereedschap in de vorm van een ballon) en met vloeistofstraalpolijsten. De machine werkt met een soort robotarm die het gereedschap verplaatst; zie Afbeelding 8. Andere technieken voor het lokaal verwijderen van materiaal zijn plasma-etsen en ionenbundelbewerken, uiteraard op andere machines.

Een iteratief proces zorgt voor het bereiken van het ideale optische oppervlak. Van het optische product wordt allereerst de afwijking van het golffront gemeten; zie Afbeelding 9. Daaruit berekent een computerprogramma de fouten in het werkstuk, die vervolgens door lokaal polijsten worden gecorrigeerd. Dat proces herhaalt zich tot de fouten in het golffront zover zijn verminderd dat ze onder de geëiste waarde liggen.



a) De Zeeko FJP600-machine van TNO.



b) Lokaal materiaal verwijderen met 'bonnet polishing'.

Microfreen op miniaturmachines

MicroNed is een gezamenlijk programma van industrie en technische universiteiten voor het verzamelen, ontwikkelen en verspreiden van kennis op het gebied van MST en MEMS. Hans Langen van de TU Delft vertelt over een project voor de realisatie van een miniatur-bewerkings-machine die een MEMS-atelier kan aanvullen. Op die machine kan zowel conventioneel worden gefreesd als vonkverspaand (EDM) of elektrochemisch bewerkt (ECM). Microsysteemproducten kunnen zo worden voorbereid, of juist nabewerkt.

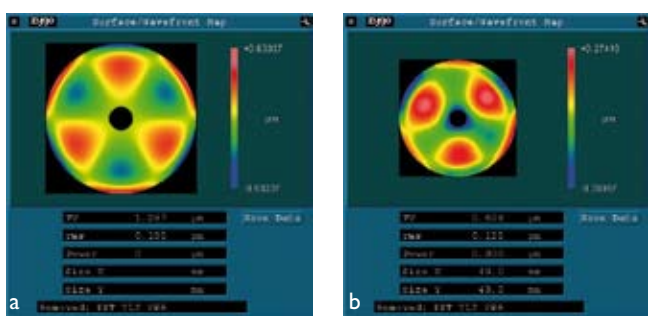
Voor het frezen is door Maarten Kimman een magnetisch gelagerde spindel ontwikkeld, die uiteindelijk een toerental van 200.000 min^{-1} moet halen. De lagersensoren – dat zijn positieopnemers – worden tevens gebruikt om de proceskrachten te schatten (werk van Rogier Blom), waardoor closed-loop-regeling van het frezen tot de mogelijkheden behoort. Op dit moment is een toerental van 120.000 min^{-1}

bereikt. Het ideaal is een machine die zowel voor frezen als voor EDM en ECM geschikt is door de software te combineren en door de spindel, het vonkgereedschap en het elektrochemisch gereedschap uitwisselbaar te maken. Daarvoor moet een soort kinematisch montagehulpmiddel met hoge reproduceerbaarheid worden ontwikkeld. Deze opzet maakt het mogelijk het kostbare omspannen van het werkstuk voor opvolgende bewerkingen te laten vervallen. Het voorlopige resultaat van het project is een table-top-machine die is uitgerust met de al genoemde magnetische spindel van 120-000 min^{-1} ; zie Afbeelding 10. In een later stadium zullen de EDM- en ECM-technologieën in de machine worden geïmplementeerd.

Microstructuren in kunststof

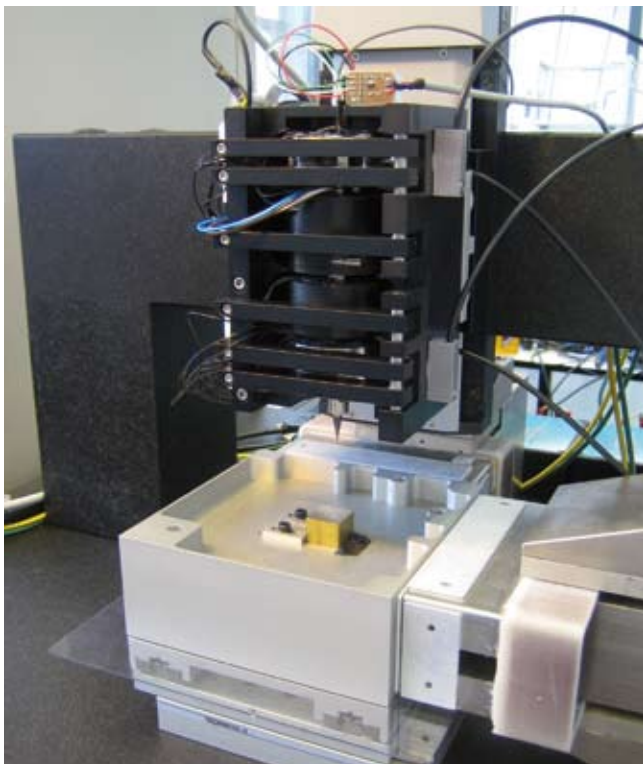
Niels van Loon doet bij TNO Industrie en Techniek in Eindhoven onderzoek naar het vormgeven van microstructuren in kunststof. Bij zijn voordracht gebruikt hij een telkamer voor spermatozoiden als voorbeeld.

Bekende microstructuren in kunststof zijn die voor gegevensdragers (DVD, R/RW, BluRay) met afmetingen van 80 tot 200 nm en hoogte-breedteverhouding van 0,01 tot 0,3; voor microfluidica (lab-on-a-chip) met afmetingen van 20 tot 100 μm en hoogte-breedteverhouding van 0,002 tot 1; en voor geïntegreerde verbindingen van metaal in kunststof met afmetingen van 50 tot 150 μm en hoogte-breedteverhouding van 0,2 tot 1.



a) Een gesimuleerde 19e-orde Zernike-fout in het golffront.
b) Het resultaat na polijsten: de afwijking is de inverse van de fout in a, omdat het teveel aan materiaal (de rode punten in a) is weggepolijst.

Voor het maken van microstructuren in kunststof zijn drie M's van groot belang: de machine, de matris en het materiaal. De spuitgietmachine moet vooral stijf zijn om vervorming te voorkomen. ICM (Injection Compression Moulding) is een techniek waarbij de matris pas sluit als het vloeibare materiaal in de matris is gespoten, waardoor de



Afbeelding 10. Een in het kader van MicroNed aan de TU Delft ontwikkelde table-top-machine met een magnetische spindel van 120.000 min⁻¹.

matrijs minder vervormt. De matrijs moet uiteraard bestand zijn tegen vervorming en de koeling moet zo gelijkmatig mogelijk zijn, dus de koelkanalen moeten het product alzijdig omgeven. Het materiaal dient in warme toestand een geringe viscositeit te hebben, maar moet bij de gebruikstemperatuur uiteraard zo viskeus, dus zo stijf mogelijk zijn.

De reeds genoemde telkamer is een moeilijk product omdat de hoogte-breedteverhouding van de uitsparing voor het monster 1 : 500 bedraagt. Afbeelding 11 laat de huidige telkamer van glas zien. Bij afmetingen van 10 bij 15 mm is de hoogte van de monsterkamer niet meer dan 10 à 100 µm. Een dergelijk product kan niet geïntegreerd worden uitgevoerd, dus is het ontworpen in de vorm van een soort deksel dat op een werkstuk met een uitsparing wordt gelijmd. Macrodimensies beïnvloeden hier microdimensies, m.a.w. vervorming van de productdelen beïnvloedt de kamerhoogte. Variatie van de lijmlaagdikte heeft hetzelfde effect. Gekozen is voor de volgende aanpak: homogene



Afbeelding 11. De telkamer van glas met een monsterkamer van 10 à 100 µm hoog, waarvoor TNO een alternatieve microstructuur in kunststof ontwikkelt.

matrijs, stabiel proces, snel geregelde machine en minimale thermische belasting bij het lijmen met laserwarming (laser bonding).

Tot slot

Het voorgaande laat zien dat niet alle voordrachten naadloos aansloten bij het thema van de dag. Desondanks kregen de deelnemers in één dag een groot aantal technologieën voorgeschoteld voor het realiseren van microstructuren. Daarbij wisselden micrometers en nanometers elkaar regelmatig af, evenals de materialen metaal, kunststof en glas. Het symposium bood dus voor elck wat wils en leverde in ieder geval een groot aantal aanspreekpunten voor degenen die worstelen met details die het blote oog niet meer kan waarnemen.

Auteursnoot

Frans Zuurveen is freelance tekstschrijver te Vlissingen.

Informatie

mail@loughulst.demon.nl	saurwalt@ecn.nl
bosman@ecn.nl	guido.gubbels@tno.nl
frank.dirne@philips.com	h.h.langen@tudelft.nl
mathieu.breukers@vdletg.com	niels.vanloon@tno.nl
max.groenendijk@lightmotif.nl	www.mikrocentrum.nl
backes@standex.com	