

Miniaturisatie eist van

James Watt was heel tevreden met een tolerantie van 1 mm voor zijn vijftigduims stoomcilinders. Tegenwoordig gelden toleranties van micrometers – en zelfs delen daarvan – als het gaat om gereedschappen en producten voor microsystemen. Was de uitdaging voor Watt nog het omzetten van warmte in zoveel mogelijk mechanisch vermogen, de hedendaagse miniaturisatie vraagt erom zo veel mogelijk functies onder te brengen op een zo klein mogelijk oppervlak. Zo worden bij mechanische bewerkingen niet alleen de spanen steeds kleiner, maar is het nodig ook andere bewerkingstechnologieën te hulp te roepen. Miniaturisatie van verspanend gereedschap heeft immers zijn grenzen en bovendien worden de materialen steeds weerbarstiger. Dat soort overwegingen zette de toon tijdens de themadag Micro- en Precisiebewerken van het Mikrocentrum op 27 maart. In Gent (B) bood het WTCM, het Wetenschappelijk-Technisch Centrum voor Metaalbewerken, een gastvrij onderdak.

• Frans Zuurveen •

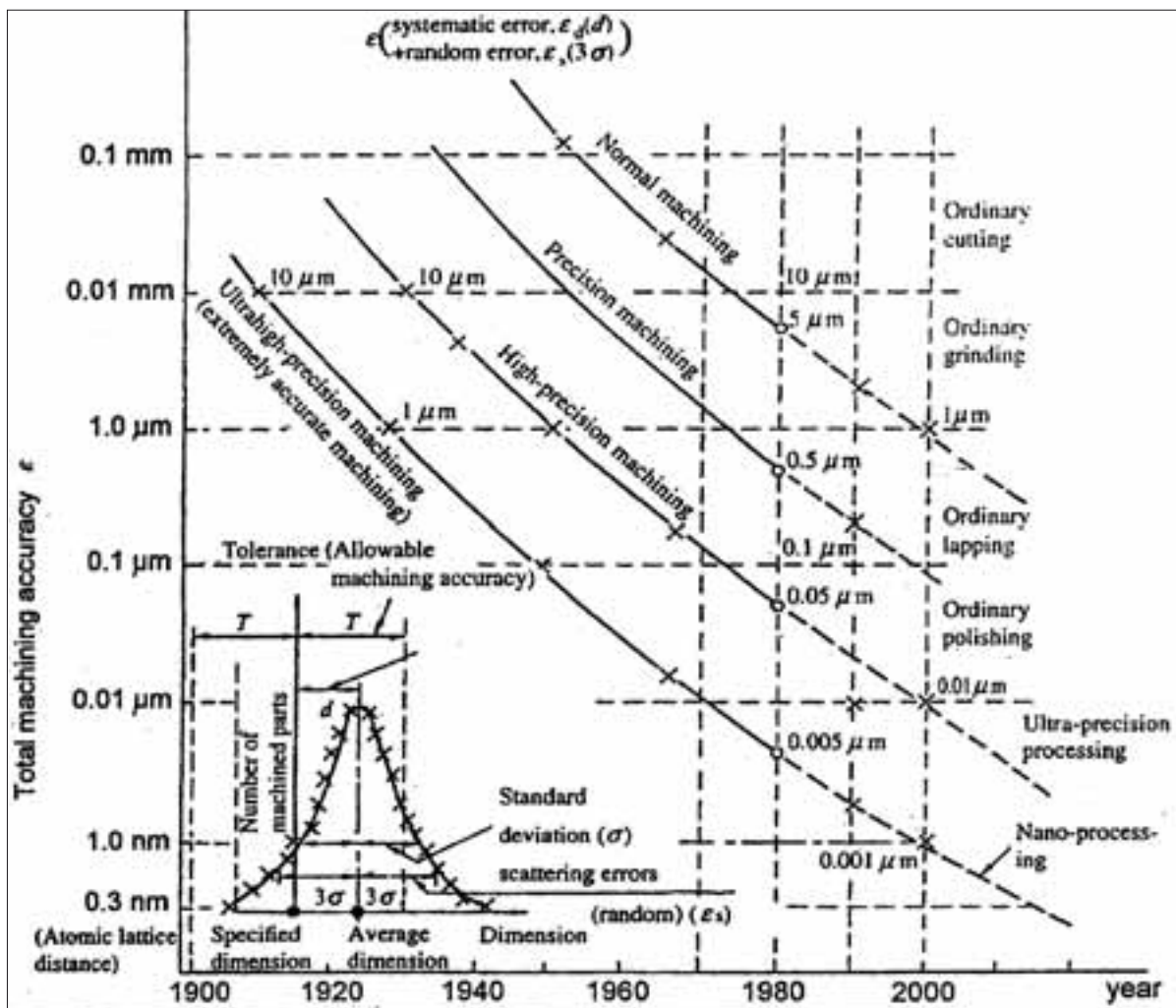
Dagvoorzitter Jean-Pierre Kruth, hoogleraar aan de Katholieke Universiteit Leuven, steekt van wal met het bekende diagram van Norio Taniguchi, dat voorspelt hoe de nauwkeurigheden van verschillende bewerkingstechnologieën zich in de tijd ontwikkelen; zie Afbeelding 1. Taniguchi introduceerde de term ‘nanotechnology’ en Kruth laat zien dat de kottermachine van John Wilkinson uit 1774 voor het bewerken van de cilinders van James Watt in de linkerbovenhoek van Taniguchi’s diagram moet worden gedacht. Daarentegen moet de vijf-assige luchtgelagerde microfreesmachine RoboNano van het Japanse FANUC – met een resolutie van 1 nm – uiterst rechtsonder worden gepositioneerd.

Kruth legt uit dat naast microverspanen andere technologieën steeds meer bestaansrecht krijgen: elektrochemisch en -fysisch bewerken, lithografie en LIGA, additieve processen als micro-stereolithografie en gelokaliseerd CVD, bundelprocessen als lasersnijden en -verspanen, micro-spuitgieten en -ponsen.

Microfreen

Tom Jacobs heeft in het WTCM-CRIF twee jaar onderzoek gedaan naar de technologie van het microfreen, eerst de machinekeuze, daarna het eigenlijke proces. In de eerste plaats concludeerde hij dat microfreen maar in beperkte mate mogelijk is op een standaardmachine. Beter is het

het uiterste maaktechnologie



Afbeelding 1. Diagram van Norio Taniguchi uit 1974, dat voorspelt hoe de nauwkeurigheden van verschillende bewerkingstechnologieën zich in de tijd ontwikkelen.

nieuwe machines te ontwikkelen met frames van graniet of polymeerbeton, aëro- of hydrostatische lageringen, kogelomloopspillen van superieure kwaliteit, geavanceerde stuursystemen, interne koelsystemen en lasermeetsystemen. Echter, de all-round microfreesmachine bestaat nog niet, want het aantal keuzeparameters is enorm.

Jacobs zoekt ook naar wetmatigheden in microverspanningscondities en constateerde onder meer dat door de relatief lage snijsnelheden koelmiddel nodig is en dat gereedschap-

coatings van voordeel zijn. Processimulatiepakketten bieden perspectief, maar hebben nu nog onvoldoende niveau. Goed opspannen van werkstukken is uiterst belangrijk maar blijft problematisch. Hij toont een evaluatie van diverse opspanmethoden, zie Tabel 1, maar concludeert dat geen enkel systeem in alle gevallen bruikbaar is. Uit vergelijking van procesbewaking via kracht versus geluid blijkt dat akoestische systemen een steeds grotere rol zullen gaan spelen omdat krachtmeting erg moeilijk is.

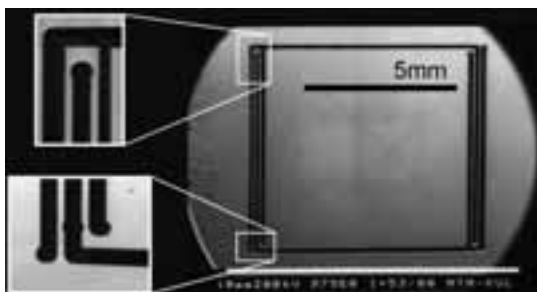
Tabel 1. Evaluatie van diverse opspanmethoden voor microfrezen.

	Herbruikbaarheid	Prijs	Opspantijd	Flexibiliteit	Nauwkeurigheid	Koeling
Mechanisch	++	-	+	-	+	+
Ijs	+	-	-	++	+	-
Vacuüm	++	-	+	-	-	-
Legering	+	-	--	++	+	+
Magnetisch	++	-	++	--	+	-
Was	+	+	-	++	--	+
Kleefband	-	++	++	-	-	-

Micro-vonkerosie

Met micro-vonkerosie kunnen niet alleen metalen maar ook keramieken en halfgeleiders worden bewerkt. Dat zegt Jan Peirs, onderzoeker aan de Katholieke Universiteit Leuven. Hetgeen betekent dat vonkerosie van silicium in hybride-microsystemen goed is te combineren met lithografische IC-technieken.

Als vonkeroderen van silicium wordt vergeleken met dat van staal, blijkt dat de hoeveelheid per tijdseenheid te verwijderen materiaal veel groter is, maar helaas ook de oppervlakteruwheid. Dat heeft als oorzaak dat – naast het gebruikelijke smelten en verdampen – bij silicium ook materiaal door thermoshock wordt versplinterd. Daardoor kunnen er bij silicium (en keramiek) ook barstjes in het oppervlak ontstaan, die door polijsten met een anisotropische etsvloeistof enigszins zijn te verwijderen. Door het etsen wordt het materiaal ook sterker. Een voorbeeld van zo'n hybride-microsysteem is een uni-axiale inclinometer, waarin de mechanische structuur is ontstaan door micro-vonkerosie en de capacitieve verplaatsingssensoren door fotolithografie; zie Afbeelding 2.



Afbeelding 2. Als op deze inclinometer door fotolithografie nog een capacitieve verplaatsingssensor wordt aangebracht, is dit een voorbeeld van een hybride-microsysteem.

Keramische materialen zijn alleen met vonkerosie te bewerken als ze voldoende geleidend zijn: de soortelijke weerstand moet kleiner zijn dan 100 Ω.cm. Van wolframcarbide, al dan niet gebonden met kobalt, is die klein genoeg, van andere keramieksoorten is het nodig ze te mengen met geleidende keramieken als TiB₂, TiN of TiC. Verder onderzoek is gedaan naar de bewerking van Si₃N₄-TiN, waarbij bleek dat Si₃N₄ en TiN onder afscheiding van N₂-gas ontleden, waardoor de ruwheid groter wordt. Het bewerken is vergeleken voor een AGIE-machine met water als elektrolyt versus een SARIX-machine met olie als elektrolyt. Bij de SARIX is de poreuze oppervlaktelaag weliswaar iets dunner dan bij de AGIE, maar toch nog te dik om een hoge oppervlaktekwaliteit te bereiken. Het best haalbare is R_a = 0,72 µm.

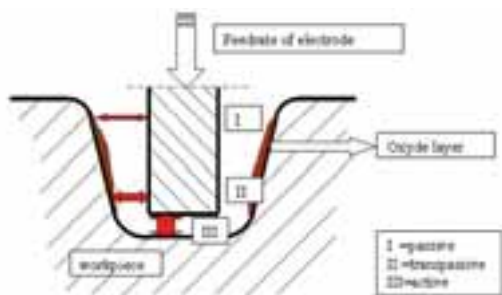
Driedimensionaal micro-vonkeroderen is op twee manieren mogelijk: met een door draadvonken of microfrezen speciaal gevormde elektrode, of door laagsgewijs te bewerken met een eenvoudige cilindrische elektrode.

Elektrochemisch precisiebewerken

Maarten Brussee heeft bij Philips een belangrijke rol gespeeld bij het invoeren van elektrochemisch precisiebewerken voor de fabricage van scheerkappen, en is nu technisch directeur van PEMTec SNC in het Franse Forbach. Elektrochemisch bewerken (ECM), stroomdoorgang via koelend en materiaal afvoerend elektrolyt met een elektrode als kathode en het werkstuk als anode, leek in de jaren zestig veelbelovend. Toch maakte het proces de verwachtingen niet waar als gevolg van enkele nadelen: milieuproblemen en onnauwkeurigheid door zijdelingse materiaalafname. Door twee verbeteringen is ECM vandaag de dag geëvolueerd tot PEM, Precision Electrochemical Machining.

De eerste verbetering is het gebruik van natriumnitrat (NaNO_3) in plaats van keukenzout in de elektrolyt. De tweede verbetering is de invoering van een vibrerende elektrode.

In een elektrolyt met NaNO_3 ontstaat er zijdelings rondom de elektrode een oxidelaag op het werkstuk: de passieve zone. Aan de onderzijde is die oxidelaag afwezig, zodat de stroomdichtheid daar het grootst is en dus ook de materiaalafname, de actieve zone; zie Afbeelding 3. Tussen beide zones bevindt zich een overgangsgebied, de transpassieve zone. De in het werkstuk gevormde holte is daardoor een exactere weergave van de vorm van de elektrode, met als gevolg een grotere nauwkeurigheid. Bovendien is het werkstuk ter plaatse van de actieve zone glad gepolijst.



Afbeelding 3. Bij PEM ontstaat er lokaal een passieve oxidelaag op het werkstuk.

Het periodiek met 50 Hz bewegen van de elektrode is karakteristiek voor het PEM-proces. Daardoor wordt de elektrolyt voortdurend verversd en het afgenomen werkstukmateriaal effectief afgevoerd. Synchroon met de elektrodebeweging wordt ook de stroom pulserend toegevoerd. De minimale spleet bij het proces is niet groter dan $10 \mu\text{m}$, wat een indicatie is voor de met PEM te bereiken nauwkeurigheid, namelijk een fractie van die waarde. Naast scheer-kappen zijn voorbeelden van de applicatie van PEM brandstofpompen, persgereedschap voor schroeffabricage, miniaturtandwielen en turbinewielen; zie Afbeelding 4.

Micro-lasercavitatie

Kortere cyclustijden van miniaturproducten vragen om snelle bewerkingstechnologieën voor precisiegereedschap van moeilijk te bewerken materialen. Arnold Giller van het Fraunhofer Instituut voor Lasertechnologie in Aken legt uit dat lasers voor die uitdaging een oplossing zijn. Hoogfrequent kortgepulste lasers voor licht met kleine

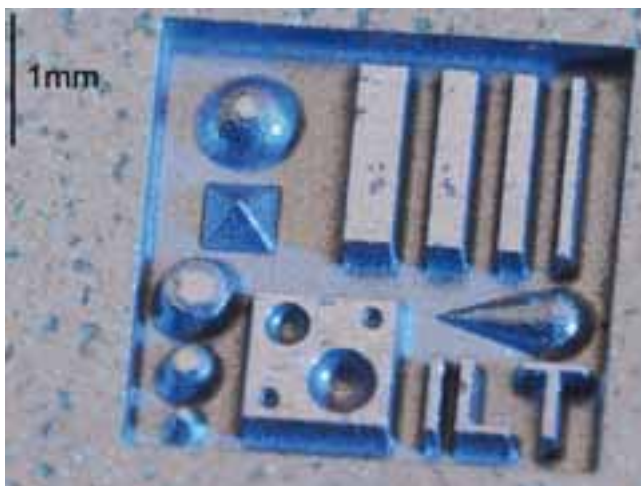


Afbeelding 4. Links enkele met PEM gemaakte turbinewielen. In het midden de elektrode, rechts het uitgangsmateriaal.

golflengte zijn geschikt om gereedschappen van keramiek, diamant en andere ‘moeilijke’ materialen nauwkeurig te bewerken. Daarbij is het de kunst het materiaal direct te laten verdampen en zo weinig mogelijk te versmelten. De meest toegepaste technologie voor gecompliceerde gereedschappen is het scannen van de laserspot over het materiaaloppervlak via bewegende spiegels met frequenties tot in het MHz-gebied.

Giller vertelt dat in het Akense onderzoek allerlei parameters zijn gevarieerd. Bij het laagsgewijs maken van structuren in bijvoorbeeld wolframcarbide levert een kleine overlap van de naast elkaar liggende bewerkingslijnen de kleinste ruwheid: $R_a \approx 1 \mu\text{m}$. Daarbij is een vijfassige Lasertec-machine gebruikt, waarmee voor fijne structuren $0,5$ tot 1 mm^3 materiaal per minuut kon worden verwijderd en voor grovere structuren 5 tot $10 \text{ mm}^3/\text{min}$. Bij het laagsgewijs bewerken is een van de problemen het beheersen van de bewerkingsnauwkeurigheid in verticale richting, dus loodrecht op het uitgangsvlak. Door meten en sturen tijdens het proces kon een nauwkeurigheid van $\pm 10 \mu\text{m}$ worden bereikt. Afbeelding 5 laat een detailstructuur zien.

Voor het boren van gaten met een laser biedt het schroefsgewijs bewerken (‘helical drilling’) de hoogste nauwkeurigheid, maar dan wel met een relatief lage materiaalafnamesnelheid. Bij rondgangfrequenties tot $40\,000$ omw/min zijn aspectratio’s tot $1:40$ bereikbaar tot een materiaaldikte van 2 mm . Het streven is een minimale gatdiameter van $1 \mu\text{m}$ te halen.



Afbeelding 5. Testwerkstuk bewerkt met een laser.

Microbewerken van kunststof

Het combineren van functionaliteiten in één precisieproduct van kunststof met afmetingen tot in het micrometergebied stelt geweldige uitdagingen. Peter Toonssen van TNO Industrie en Techniek in Eindhoven illustreert dat voor de integratie van functies in een matrix ('in-mould assembly'). Voorbeelden daarvan zijn MID (Moulded Interconnected Devices), waarbij mechanische en elektrische functies zijn geïntegreerd, en de ontwikkeling van lijn-vormige sensorstructuren ('sensor arrays'). Bij MID is een geleidend patroon opgenomen in of op een spuitgegoten substraat van kunststof. Verdere integratie vraagt om interconnectietechnologieën als solderen, lijmen, mechanisch verbinden, wire-bonden en lassen. Belangrijk daarbij is de temperatuurbestendigheid van de materialen en het op elkaar aansluiten van de thermische uitzettingscoëfficiënten. Afbeelding 6 toont een voorbeeld.



Afbeelding 6. Een LED-voet als voorbeeld van een geslaagde Moulded Interconnected Device die wat betreft de temperatuurhuishouding is geoptimaliseerd.

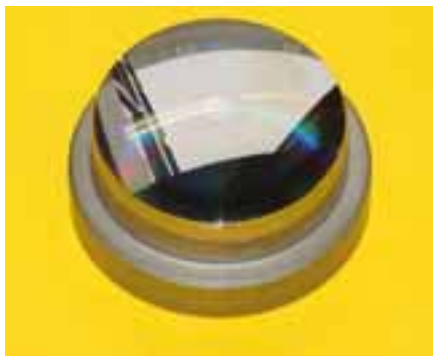
In samenwerking met het Holst Centre in Eindhoven is een kunststof-sensorstructuur in ontwikkeling met integratie van fluidica, optica en actieve elektronische componenten. Dit soort structuren biedt de mogelijkheid tal van analyses sneller en met minder monstermateriaal uit te voeren. In de meest vergaande vorm van integratie van alle functies kunnen draagbare mini-apparaten analyses op locatie uitvoeren.

Toonssen vertelt verder dat door de toenemende integratie van producten met hoge elektronicadichtheid EMS (Electro Magnetic Shielding) steeds belangrijker wordt. Rondom de geïntegreerde producten moet ter bescherming tegen uitwendige elektrische en magnetische velden voldoende elektrisch geleidend materiaal worden aangebracht. Geleidend polymeren bieden daarvoor perspectief. TNO Industrie en Techniek participeert daarom in het internationale project PolyCond voor onderzoek naar kunststoffen die zijn gevuld met koolstof nanotubes.

Precisieverspanen van hard materiaal

Michael Heselhaus, onderzoeker in het Fraunhofer Instituut voor Productietechnologie in Aken, spreekt over het precisieslijpen en -draaien van harde en brosse materialen: gehard staal en keramiek. ELID (Electrolytic in-Process Dressing) is een slijptechniek die de nauwkeurigheid van het slijpproces vergroot, aangezien de slijpschijf gedurende het proces wordt gedressd, wat steeds verse snijkanten garandeert. In Aken zijn ELID-proeven gedaan met een Moore Nanotech 500 FG, een vijfassige ultraprecisie-slijpmachine met een positioneer-nauwkeurigheid van 10 nm voor translatie en 1,3 boogsec voor rotatie. ELID blijkt een verbetering van circa een factor twee op te leveren voor ruwheid en optische kwaliteit.

Met monokristallijn diamant als gereedschap zijn geharde staallegeringen bewerkt, met als bijzonderheid de ultrasone excitatie van het gereedschap in de verspaningsrichting: amplitude 1 tot 5 μm , frequentie 40 kHz. Met de excitatie wordt bereikt dat het koelmiddel beter circuleert, de wrijving tussen gereedschap en spaan vermindert en de proceskrachten kleiner worden. Dat laatste als gevolg van de afname van de gemiddelde duur van het contact tussen beitelpunt en werkstuk. De levensduur van het gereedschap blijkt maar liefst een factor 50 tot 100 groter te worden. Afbeelding 7 toont een op deze manier bewerkt matrijsinzetstuk van X40Cr14 (hardheid 52 RC) met optische oppervlaktekwaliteit.



Afbeelding 7. Een met gereedschapexcitatie bewerkte matrijs-inzetstuk met optische oppervlaktekwaliteit.

Onderdrukking van trillingen

Trillingen in gereedschapswerktuigen worden ‘chatter’ genoemd. Han Oosterling, vakgebiedsleider verspaning bij TNO Industrie en Techniek in Eindhoven, legt uit dat chatter een ruw werkstukoppervlak en veel gereedschapslijtage veroorzaakt. Voor precisiebewerkingen is het essentieel chatter te voorkomen. Daarom heeft TNO een methode ontwikkeld om tijdens het freesproces te constateren of chatter gaat optreden, waarna ‘just in time’ maatregelen worden getroffen om dat te onderdrukken.

De chatterschijnselen zijn te karakteriseren door een grenskromme voor snedediepte als functie van het hoofdspiltoerental, die de gebieden scheidt waarin wel of juist

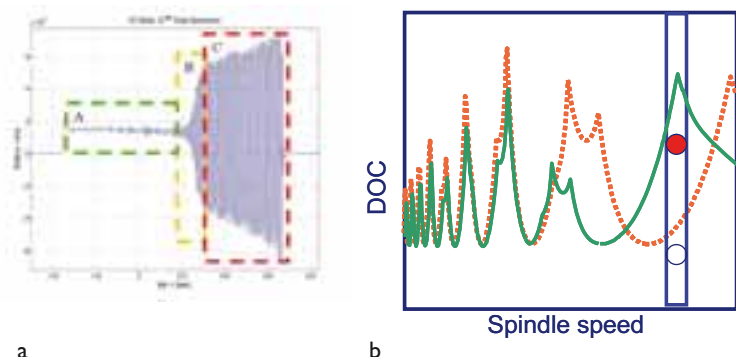
geen chatter optreedt. Er zijn voor het beïnvloeden van het verloop van de chatter-grenskromme twee benaderingen mogelijk. Dat zijn het aanpassen van het hoofdspiltoerental en het veranderen van het dynamisch gedrag van de hoofdspil, beide met als doel de grenskromme zo te verschuiven dat het werkpunt van het verspaningsproces eronder komt te liggen; zie Afbeelding 8. Voor het veranderen van het dynamisch gedrag kan bijvoorbeeld de voorspanning van de spindellagers worden aangepast.

Het onderzoek bij TNO is zover gevorderd dat voor de eerste benadering de opstelling voor de trillingsmeting via een versnellingsopnemer bij de spindel klaar is. Ook de benodigde regelelektronica is gerealiseerd, zodat er nu proeven lopen om het systeem te testen en er patent kon worden aangevraagd. Het onderzoek naar methoden voor de tweede benadering is onlangs gestart.

Microfreesen frezen niet

Diethard Thomas van Fette GmbH, gereedschapfabrikant in Schwarzenbek (D), zegt dat de basisverspaningstheorie voor microfreesen niet meer opgaat. Omdat de aanzet per tand in dezelfde grootte-orde ligt als de rondloopnauwkeurigheid, vindt er geen echte verspaning plaats. Eigenlijk lijkt microfreesen meer op slijpen met ongedefinieerde snijkanten. Enkele globale getallen: freesdiameter 100 μm , afmeting carbidekorrel 0,4 μm , onregelmatigheid snijkanten 0,1 μm , aanzet per tand 1 μm , radiale rondloopafwijking van spangereedschap 3 μm . Door deze geometrische condities is het vrijwel zeker dat steeds maar één van beide snijkanten van een microfrees daadwerkelijk actief is en dat die snijkant niet over de hele lengte snijdt. Immers, alleen de toppen van de snijkant zijn actief in dat proces, dat op slijpen lijkt. Daar komt bij dat – door de geringe freesdiameter – de gebruikelijke snijsnelheden niet worden gehaald. Daarvoor zou voor een freesdiameter van 100 μm een – onhaalbaar – toerental van meer dan 500.000 omw/min nodig zijn.

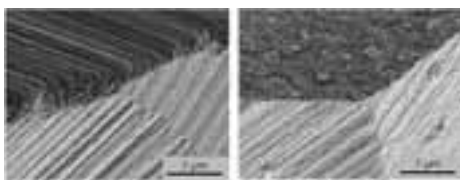
Maatregelen ter vermindering van de geschetste problemen zijn het minimaliseren van de totale rondloopafwijking van het systeem, het vergroten van het oppervlak van de freedoorsnede en het dressen van de snijkant met bijvoorbeeld een ionenbundel; zie Afbeelding 9. Die inzichten hebben geleid tot een nieuwe generatie van Fette microfreesen met diameters van 0,2 tot 2 mm, de serie HSCLine met fijnkorrelige carbide- of diamantcoating.



Afbeelding 8. Chatter.

(a) A stabiel proces, B begin van chatter, C volledig hoorbare en op het werkstuk zichtbare chatter.

(b) Onderdrukking door verschuiven van de grenskromme via aanpassing van het spindeltoerental. (DOC = Depth of Cut)



Afbeelding 9. Dressen van een snijkant met een ionenbundel; links vóór het dressen, rechts erna.

Nauwkeurig 'plaatwerk' door fotochemie

PGE-Adenco in Eindhoven en Mechelen is gespecialiseerd in het fotochemisch etsen en elektroformer van complex gevormde metalen componenten met nauwe toleranties. Conny Linthout legt uit hoe het maakproces verloopt, vanaf data-ontvangst, via elektronische en digitale dataverwerking, het aanmaken van een fotomasker, het prepareren van het basismateriaal (etsen) of de nikkelen draagplaat (formen), het aanbrengen van een fotogevoelige laag (voor etsen meestal tweezijdig, voor formeren enkelzijdig), enkel- of dubbelzijdige belichting, de ontwikkeling van de fotogevoelige laag, het strippen daarvan, tot en met het eigenlijke proces van etsen of opgroeien. Dat wordt dan nog (eventueel) gevolgd door een nabehandeling, bijvoorbeeld vertinnen, vergulden of anodiseren.

Voordelen van fotochemische processen zijn onder meer flexibiliteit, korte levertijd, braamvrijheid, lage gereedschapkosten, afstemming op dunne materialen (< 1 mm dikte), complexe vormen, spanningsvrijheid. Afbeelding 10 geeft voorbeelden van enkele geëtsde producten.

Tot slot

Micro- en precisiebewerken vraagt om aangepaste technologieën. Duidelijk is wel dat verspanen daarin een ondergeschikte rol gaat krijgen. Deze themadag toonde aan dat verspanen op microschaal duidelijk verschilt van dat op macroschaal, en gaf de aanwezigen een heldere kijk op alternatieven. De informatie van de themadag – met eventuele aanvulling via de hiernaast vermelde e-mailadressen –



Afbeelding 10. Enkele voorbeelden van geëtsde producten van PGE-Adenco.

maakt het productontwerpers makkelijker een keuze te maken uit de beschikbare en toekomstige technologieën.

Auteursnoot

Frans Zuurveen is freelance tekstschrijver te Vlissingen.

Informatie

jean-pierre.kruth@mech.kuleuven.ac.be
 tom.jacobs@wtcm.be
 jan.peirs@mech.kuleuven.be
 m.brussee@pemtec.de
 arnold.gillner@ilt.fraunhofer.de
 peter.toonsen@tno.nl
 michael.heselhaus@ipt.fraunhofer.de
 han.oosterling@tno.nl
 dthomas@fette.com
 conny.linthout@adenco.be

