

Sterke evolutie elektrochemisch

Lukt het verspanend niet, dan komen onconventionele processen en afgeleide alternatieven in het spel. Als vrijwel geen andere alternatief heeft Electro Chemical Machining (ECM) sterke progressie gemaakt. Innovaties veranderden het bekende elektrolyseproces in een bruikbare, hoogprecieze metaalbewerkingstechniek met hoge toegevoegde waarde. Evolutie in zowel techniek als apparatuur versterkt de grotendeels onbekende voordelen. Tevens zijn bestaande praktische minpunten verholpen. Verschillende specialisten melden vooruitgang in productiviteit en milieu- en energiebewustheid van universeelere, bedieningsvriendelijkere CNC-machines met verbeterd eindresultaat.

• *Jan Wijers* •

A ‘Alternatief’ staat voor ‘extra keuzemogelijkheid’ of ‘niet traditioneel’. Ondanks het grote aantal industriële verspaningsprocessen blijft in de praktijk behoefte aan vrijere techniekeus. De productcomplexiteit neemt nog steeds toe. Ontwerpers passen – schijnbaar ongehinderd door fabricagetechnisch inzicht – toenemend ‘nieuwe’, harde, brosse, slijtage- en hittebestendige of hoge-sterktematerialen toe. Die zijn puur verspanend nauwelijks vorm te geven op technisch/economisch verantwoorde wijze.

Verspaning – met direct fysiek contact tussen snijgereedschap en werkstuk, en inbreng van hoge krachten – loopt metallurgisch tegen grenzen aan. Frezen en beitels moeten namelijk harder en slijtvaster zijn dan het werkstuk. Procestechnisch verloopt – zeker HSC – verspaning zeer efficiënt. De efficiencywinst gaat echter telkens verloren in de vertaling van CAD naar CAM. De CAM-file zorgt dat

standaardsnijgereedschap middels productspecifieke bewegingen het product genereert. Optredende braamvorming, structuurverandering en spanningsopbouw in het werkstuk accepteren opdrachtgevers uit bijvoorbeeld medische, elektronische en aerospace-sectoren niet, mede vanwege de vereiste nabehandeling.

Industrieel hangt inzet van een techniek af van grondige afweging van criteria als productgeometrie, uitgangsmateriaal, aantallen, benodigd gereedschap (standaard of specifiek), vereiste eindkwaliteit van het stuk, enzovoort. Onconventionele technieken bieden op sommige aspecten potentieel een betere geschiktheid voor series complexe producten, kunnen meerdere verschillende basisbewerkingen uitvoeren in één opspanning, met naar wens een ruimere variëteit in (afwerkings)kwaliteit en metaallegeringen.

bewerken

Progressie alternatieven

Moderne producten, min of meer exotische materialen en geavanceerde productieprocessen vragen om alternatieve technieken op basis van contactloze materiaalafname. In het algemeen heeft inzet van alternatieve technieken als één-op-één vervanger van traditionele technieken geen zin. Er dient op zijn minst extra toegevoegde waarde te ontstaan: tot nu toe niet te fabriceren complexe vormen worden haalbaar, niet-verspaanbaar materiaal is gecontroleerd te verwijderen, de bewerkingsnelheid is voorspelbaar hoger of in serieproductie ontstaan aanzienlijk lagere (gereedschap)kosten, enzovoort. De laatste jaren is sterke progressie gemaakt door dieper fundamenteel inzicht in bedoelde processen. Anderzijds brengt introductie van hoogwaardige elektronische componenten voor procesbeheersing, geavanceerde machinebouw, moderne besturings-techniek én betere technologie de alternatieve processen op aanzienlijk hoger plan. Reden waarom ECM en precisie-ECM (PECM) momenteel vaak niches opvullen tussen meer alledaagse verspaningsprocessen.

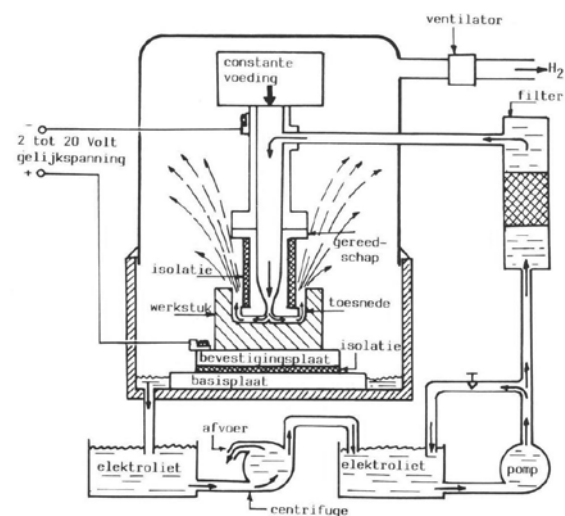
Proceswerking

ECM-bewerken kent geen 'hardheidsdrempel'. Contactloos zijn elektrisch geleidende metalen – inclusief gehard gereedschapstaal, magnetische materialen, superlegeringen en titaan, maar ook aluminiumsoorten – met een afbeeldende elektrode vorm te geven. De basis vormt het bekende proces van gecontroleerd anodisch metaaloplossen door 'elektrolyse' bij gelijkstroomdoorvoer. Materiaalafname komt tot stand door potentiaalverschil tussen twee op een stroombron aangesloten elektrodes van elektrisch geleidend materiaal in een waterige, geleidende procesvloeistof – het elektrolyt – te dompelen. Gebruik van een dergelijk procesmedium vergt extra maatregelen en voorzieningen. Het werkstuk(materiaal) is de ene, positief geschakelde 'elektrode' (anode) in het elektrische circuit. De andere is de vormgevende (gereedschap)elektrode. Beiden worden nauwkeurig tegenover elkaar gepositioneerd op een kleine afstand (werkspleet: standaard 0,10-1,0 mm). Van groot economisch-technisch voordeel is het feit dat geen elektrodesleet optreedt. Belangrijk is dat het vrij complexe procesgedrag door steeds reëlere modellen beter te simuleren is.

Elektrolyt belangrijke schakel

Standaard zit het hoofdproces vast aan het toegepaste medium, hier een elektrolyt. In de werkspleet spelen elektrochemische reacties tussen de elektrodes alsmede een chemische reactie in het elektrolyt. Meestal is ter verhoging van het geleidingsvermogen sprake van een waterige, neutraal reagerende oplossing van een zout (Na_2NO_3 of NaCl ; circa 20 (gewichts)procent, met constante pH van circa 7) of zuur (bijvoorbeeld H_2SO_4). Tijdens ECM'en neemt het eindproduct binnen de kortste tijd één op één, alzijdig en gelijkmatig de vorm over van de negatief geschakelde elektrode. De vormnauwkeurigheid ligt bij traditioneel ECM tussen 0,4-0,04 mm. Het onder druk (≤ 25 bar) ingespoten actieve medium – bedrijfstemperatuur 20-50 °C – kent nog twee essentiële functies: het koelt en voert opgelost materiaal samen met reactiestoffen af uit de bewerkingszone. Als bijproduct vrijkomende gassen, H_2 en O_2 , worden afgezogen.

ECM heeft vanouds de roep vervuילend te zijn. Bij huidige geavanceerde installaties is dat nog maar ten dele waar, doordat milieuaspecten zeer veel aandacht krijgen; zie Afbeelding 1. Zo is het afvalvolume drastisch teruggebracht. Wel ontstaan moeilijk oplosbare metaalhydroxyden die gecontroleerd zijn af te voeren.



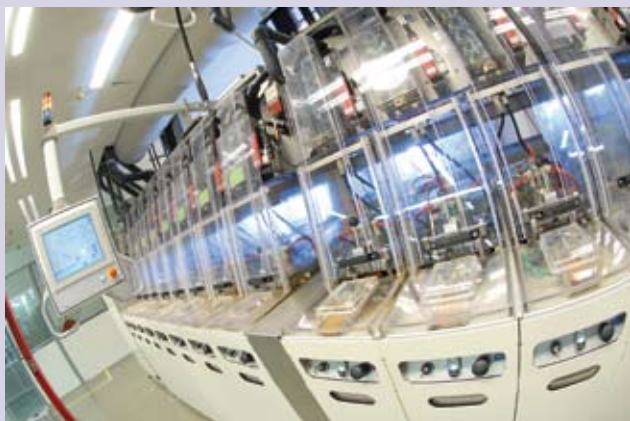
Afbeelding 1. ECM-praktijkopstelling (Bron: W.I.S.E., 2000)

Nederland sterk in ECM

Recent nog leek de na de Tweede Wereldoorlog opgedane ECM-kennis in het Westen verdwenen te zijn. Alleen in Aken, Glasgow en Leuven werd het proces verder ontwikkeld. In het Oostblok was men er op diverse plaatsen actief mee bezig. Frappant is de concentratie van Nederlandse specialisten en bedrijven binnen het kleine ECM-wereldje. Decennialang is de fabricage van roterende scheerapparaten geconcentreerd bij Philips Drachten. EDM (Electrical Discharge Machining) is daar nu vervangen door ECM voor vlakken van de flexibele, braamloos gestampte mesjes alsmede voor het snijden van de gleuven (breed 0,14 mm, tolerantie $< 10 \mu\text{m}$, binnen enkele tientallen seconden). Geïntroduceerde complexe designelementen maakten dat het 'rechtlijnige' draadvonken niet meer toereikend was. Tevens worden hoogwaardig gepolijste sferische loop- en zichtvlakken verlangd; zie Afbeelding 2. Vandaar dat na een langjarig R&D-traject de introductie volgde van eigenbouw ECM-machines in de productie, op basis van volledige beheersing van proces-knowhow (onder meer [1]), mechanica, software en elektronica. Voorjaar 2007 nam BrainCenter de afdeling Equipment Engineering over, die de unieke productiemachines ontwerpt; zie Afbeelding 3.



Afbeelding 2. Middels ECM in massa gefabriceerde scheerkap.



Afbeelding 3. Productspecifieke ECM-installatie in de productie. (Foto: BrainCenter)

Enkele ex-Philips-technologen zijn overtuigd van de grote toekomst van ECM zelfstandig verder gegaan. Zo richtte Hans-Henk Wolters ECM Technologies op (onderzoek plus advisering aan derden), met als productie-ondersteuning ECM Productions. Dat is trouwens een typisch kenmerk in deze sector: het merendeel van de machineleveranciers biedt zich tevens aan als toeleverancier van ECM-producten. Begrijpelijk, omdat door het commercieel inzetten van bestaande kennis onder productiecondities tegelijk de technologie verdiept en verbreed kan worden. Collega-procestechnoloog Maarten Brussee zwaait wat R&D aangaat met succes de scepter bij het herboren Franse bedrijf PEMTec.

Behalve de niche-toepassingen in Drachten vindt ECM in de Benelux industrieel voornamelijk plaats voor boren binnen toeleverende aerospacefirma's en meer algemeen ontbramen in secondentakt binnen de massaproductie. Van nature heeft ECM een afrondende werking op scherpe kanten, wat het uitstekend geschikt maakt voor gedefinieerd verwijderen van bramen, ontstaan als ongewenst effect van verspanen. Elektrolytisch ontbramen – na verspaning – is veelgevraagd. Deze snelle ECM-variant (zie Afbeelding 4) in de hand houden is gemakkelijker dan bij het genereren van complexe vormen, doordat de elektrode (kathode) in een vaste stand werkt. Met verfijnde instellingen kan de oppervlaktegesteldheid (standaard R_a 0,5 μm) verbeterd worden tot op een gladheid van 0,05 (normaal) of 0,01 μm R_a (extreem).



Afbeelding 4. ECM-ontbraammachine werkend bij ECM Productions.

Kenmerkend voor ECM is dat de ‘verspaningscapaciteit’ direct afhankelijk is van het te bewerken materiaal. Tevens stelt de materiaalafnamesnelheid zich lineair in op vooral stroomdichtheid (A/cm^2 : 10 - > 500). De verdeling daarvan varieert afhankelijk van de plaatselijke elektrodegeometrie, resulterend in een niet geheel equidistante spleet. De eindnauwkeurigheid hangt onder meer af van de toepassing, de processpleetgrootte en de spanning die erover staat.

Hybride varianten

Als vrijwel geen andere techniek biedt ECM intrinsieke mogelijkheden bewerkingen te combineren. Bijgevolg bestaat een veelheid van hybride versies. Doelgericht worden – door processen samen te voegen – tegelijk negatieve aspecten teruggedrongen en positieve effecten gebundeld (bijvoorbeeld ter verhoging van verspaningscapaciteit en eindnauwkeurigheid, verkorting van doorlooptijd, en optimalisatie van ruwheid en oppervlaktegesteldheid) in één cyclus. Diverse combi’s verkeren nog in de testfase. Experimentele resultaten (onder meer uit Leuven) – zelfs op brosse, niet-geleidende materialen – worden al gerapporteerd van ECDM (ook wel ECAM, Electro Chemical Arc Machining: vonkersie met galvanisch oplossen), TW-ECM (Traveling Wire: draadvonken plus ECM), ECDG (Electro Chemical Discharge Grinding: ECM-slijpen met vonken), AECG (Abrasive Electro Chemical Grinding: electrochemisch slijpen) en zelfs LAJECM (Laser Assisted Jet ECM). Vooral Japan bedacht interessante ECM-combinaties.

Een eerste combiproces lag voor de hand door EDM met ECM te vergelijken op gelijkenis. Beide gebruiken een van het werkstuk afgeleide, voorgevormde elektrode als gereedschap. Identiek is ook de contactloze metaalverwijdering over een werkspleet waartussen geforceerd procesmedium stroomt. Bij alle twee maakt een gestuurde (puls)voeding deel uit van de machine, net als een filteraggregaat. Bekend is dat navonken veel tijd kost. ECM levert ongeacht de vorm ongekend snel een op lage ruwheid perfect afgewerkt egaal, (eventueel glanzend) oppervlak. Het idee achter het ECDM-proces was logisch: na voorvonken elektrode én werkstuk overzetten op een speciale machine voor snel ECM-nawerken en polijsten met behoud van maat- en vormnauwkeurigheid. Binnen korte tijd zijn blinde en doorlopende 3D vormen – met verwijdering van de HAZ-laag (hittebeïnvloede zone) – te finishen. Geavanceerde vonktechnologie realiseert betere ruwheden echter aanzienlijk sneller, waardoor deze dure combi achterhaalt lijkt.

Eveneens Japans is ELID Grinding (ElectroLytic-In-process-Dressing; in Europa geleverd door het Zwitserse Agathon). Primaair doel van deze ultrafijne slijpvariant is de kwalitatief sterk verbeterde oppervlaktegesteldheid zonder structuurverstoring en restspanningen. Door continu in-proces de speciale schijf – ultrafijne korrels in hoge concentratie – elektrolytisch te dresen, komt de juiste topografie binnen bereik voor finishslijpen met een gladheid rond 10-12 nm op keramiek (Si_3N_4 , ZrO_2), hardmetaal en molybdeen. Bijkomende winst vormen de 5-10 keer lagere krachten dan bij normaal slijpen en de tot 10 keer hogere materiaalafname vergeleken met polijsten als finishbewerking.

Plusen en minnen ECM

- + Contactloos, snel, nauwkeurig proces
- + Proceskrachten nihil
- + Geen invloed mechanische materiaaleigenschappen
- + Geen elektrodesleet (soms door cavitatie)
- + Complexe vormen (blind en doorlopend) ineens te fabriceren
- + Geen contaminatie met vreemd materiaal
- + Thermisch neutraal (geen HAZ)
- + Glad oppervlak
- + Geen braamvorming
- + Enkelstuks- maar vooral serieproductie
- + Geschikt voor microbewerking

- CAD-ontwerp elektrode trial & error procedure
- Relatief hoog energieverbruik
- Milieuaspecten
- Hoge initiële kosten
- Vrij onbekend proces

Configuratie

Naar opbouw zijn universele standaardmachines te onderkennen en op maat gefabriceerde speciale concepten. Onderling verschillen die sterk, gelet op mechanische opbouw, elektrische voeding, chemische installatie en sturing. Als een van de weinige fabrikanten levert het Duits/Franse bedrijf PEMTec standaardmachines voor breed universeel gebruik. Op de eerste blik wijken die precisie elektrochemische machines (vandaar PEM prominent in de firmanaam) weinig af van moderne freesmachines; zie Afbeelding 5. Voor juiste processturing en -bewaking zorgt



Afbeelding 5. Universeel PEMcenter; in het midden de mechanica, links het elektrolytstelsel, rechts de pulsgenerator. (Foto: PEMTec)

de eigen industriële PC-besturing samen met het eveneens zelf ontwikkelde PEM-softpakket. Gewerkt wordt met pulsen en een gedwongen elektrodetrilling, waarmee de Fransen de productnauwkeurigheid opgevoerd hebben tot 2-5 μm . Opvallend aan het PEMCenter zijn de toegevoegde, forse, strak vormgegeven units als de procesregeling, generatorkast en centrale elektrolytunit.

Door samenballing van elektrolytopslag, drukopwekking, filtereenheid en koelsysteem in één gesloten unit vormt het vloeistofaggregaat een uitermate belangrijk subsysteem. Ook hier is sprake van een stijf portaalframe uit graniet met goed toegankelijke vaste tafel (opspanvlak: 550x550 mm, belastbaar tot 200 kg). Merendeels vindt de bewerking in positie plaats, waarbij alleen de verticale pinole met de elektrode (maximaal 50 kg) met hoge resolutie (1 μm) over precisierichtgeleidingen in Z-richting beweegt. Zodra de ECM-reactie op gang komt, lost metaal op, hetgeen de spleet vergroot. Die wordt constant gehouden door de elektrode servogestuurd – op het randje van kortsluiting – het werkstuk in te bewegen (gemiddeld met 1-10 mm/min). Bijzonder is dat zo de aanzienlijk verkleinde werkafstand ($\geq 10 \mu\text{m}$) tussen de op snelwisselpallets gespannen stukken en elektrodes aan te houden is.

Industrieel worden al enige decennia product- en proces-specifieke installaties ingezet zoals de turnkeymachines die ECM Technologies op maat ontwerpt en bouwt. Dergelijke productie CNC-installaties – zoals de speciale ECD-booropstelling van Afbeelding 6 – worden op projectbasis geconstrueerd, modulair opgebouwd en bedrijfsklaar geleverd. Dit gebeurt meestal nadat aan de hand van specificaties een tevoren voor de klant uitgevoerde theoretisch/praktische en economische haalbaarheidsstudie is uitgevoerd.

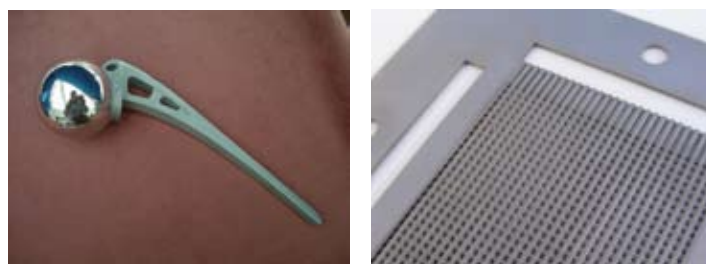
Breed spectrum applicaties

Het spectrum van 3D-stukken dat met alle ECM-technieken – van zinken en boren tot ontbramen en polijsten – wordt gefabriceerd, is uiterst divers; zie Afbeelding 7. Te denken valt daarbij onder meer aan nucleaire (vertandingen), medische (prothesen) en hydraulische (schakel/verdeel) componenten, de micro-elektronica, de luchtvaart- (blisks, schoepen), ruimtevaart- (honingraatconstructies) en



Afbeelding 6. Klantspecifiek ontwikkelde ECD-boormachine (Foto: ECM Technologies)

automobiëlindustrie; zie ook Afbeelding 8. ECM biedt in bepaalde gevallen de primaire oplossing met voor niet-ingewijden nogal eens verbluffend resultaat. Bijvoorbeeld waar bestaande mechanisch georiënteerde verspaningstechnieken tekortschieten op nauwkeurigheid, of waar alternatieven als laser- en elektronenstraalboren kans geven op ontoelaatbare, hittebeïnvloede zones (HAZ).



Afbeelding 7. Voorbeelden van ECM-kunnen.

(Foto's: ECM Productions)

- (a) Een gepolijste prothese.
- (b) Een RVS-plaat voor een brandstofcel.

De luchtvaart stelt ook steeds striktere eisen, grotendeels om meer vrijheid te krijgen bij het opvoeren van de afgeleverde stuwkracht. De daarbij benodigde opgevoerde bedrijfstemperatuur over een langere tijdsduur vereist intensievere koeling, optimale isolatie en afdichting. Naast het zinken van complexe vormen dient daarbij gedacht te worden aan precisieboren met in bepaalde gevallen ongekende, constante of verlopende langs- en/of dwars-



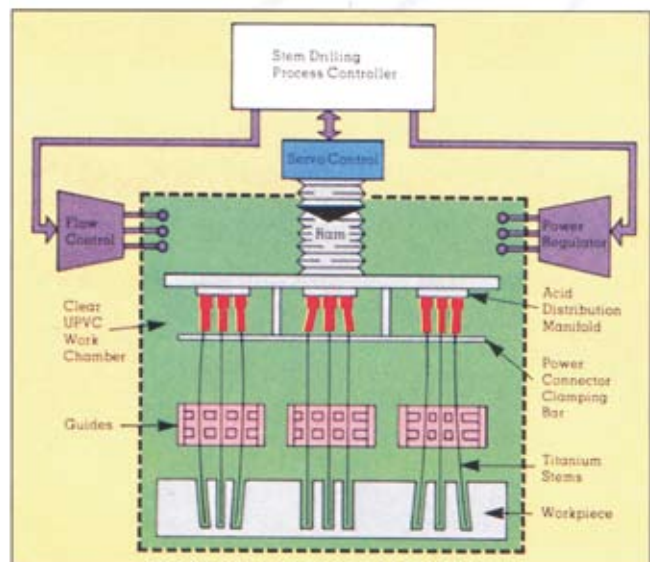
Afbeelding 8. Nieuwste 5-assige Bliks-machine, voor het maken van een turbine-wiel uit één stuk. (Foto: DK-Tec)

doorsneden. Extra aandacht vergen voor een optimaal ECM-verloop productspecifieke tooling-aspecten rondom gereedschap en werkstuk. Die kunnen – vooral voor ontbramen – complex van aard zijn en hoge kosten vragen voor meervoudige, stabiele, exacte klemming, elektrolyt-doorvoer en (inwendige) geometrie. Hier liggen economisch-technische drempels.

Zonder ECD geen vliegtuigen

Behoeft bestaat er bijgevolg aan industriële boorprocessen die op economische wijze koelkanalen in turbine-schoepen kunnen aanbrengen volgens de strak gespecificeerde maat ($\varnothing 0,025-6$ mm), inwendige vorm en lengte-diameterverhouding (aspectratio tot 300:1). Een reeks geavanceerde boortechnieken die daaraan – vaak als het laatste redmiddel – tegemoet komt, staat bekend onder de verzamelnaam elektrochemisch boren (ECD, Electro Chemical Drilling). Merendeels kenmerken deze zich door een buiselektrode – soms op de omtrek geïsoleerd om ‘verspaning’ uitsluitend plaats te laten vinden op de gewenste, meestal frontale, vlakken – waarbij het zure elektrolyt door het hart wordt toegevoerd. Veel gebruikt wordt STEM (Shaped Tubular Electrochemical Machining met geïsoleerd titaanbuisje; zie Afbeelding 9), CD (Capillary Drilling glasbuisje met inwendig een extreem dun draadje) en ESD (Electro Stream Drilling glascapillair voor fijne straal elektrolyt) onder meer bij firma’s die turbines bouwen en reviseren (als Eldim in Arcen).

Middels ECM zijn in door hardheid en/of taaiheid moeilijk bewerkbare materialen enkel- of meervoudig relatief snel inwendig vrij willekeurige (ook kruisende) geometriën aan te brengen als rond, ovaal, rechthoekig, vierkant of anders. Additioneel sterk punt is dat door gerichte variatie in de ECD-boorparameters een gecontroleerd verloop van zowel de axiale, bijvoorbeeld conische vorm, als de radiale door-



Afbeelding 9. Schematische weergave van een multi-part STEM boorsysteem.

snede, bijvoorbeeld geribbelde of ‘turbulator’-vorm, van het rechte of boogvormige boorkanaal kan worden gefabriceerd. Breed wordt gezocht naar 3D-mogelijkheden voor nog grotere vrijheid in inwendige contouren. Uiteraard past men ook hier tegenboren toe vanuit de tegenoverliggende kant, onder willekeurige intreehoek, om de haalbare boordiepte te vergroten.

Puls sleutel tot micro-ECM

De jongste, merendeels gepatenteerde, elektronische en elektromechanische innovaties grijpen direct in het hart van het ECM-proces in door invoering van geavanceerde processturingen, DC-pulsgeneratoren en nauwkeurig repeterende elektrodepulsatie. Door de – ten opzichte van DC-ECM – verhoogde stabiliteit, verbeterde procescontrole en



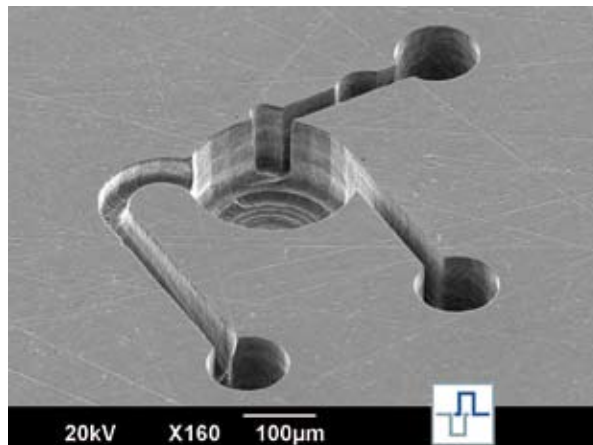
Afbeelding 10. Speciaal voor ECF ontwikkelde 'Mikro' bewerkingsmachine. (Foto: ECMTEC)

effectievere energieoverdracht met dergelijke moderne apparatuur, komt ineens microbewerken met hoge nauwkeurigheid binnen bereik, hetgeen de scope van ECM maatgevend vergroot.

Op twee fronten brengt pulsatie markante verbeteringen. Hoofdvoordeel is dat een vibrerende elektrodebeweging (40 Hz) het procesverloop positief ondersteunt. De afvoer van met metaaldeeltjes vervuild elektrolyt verbetert sterk, zelfs bij verkleinde inter-elektrode afstand. Twee oorspronkelijke tekortkomingen zijn zo weggewerkt, namelijk ongecontroleerde variaties in oplosnelheid door parasitaire stroompjes en lagere precisie door (te) grote werkspleet. Kort de stroomrichting met bipolaire pulsen omkeren voorkomt tevens aangroei en passivering van het oppervlak. Bovendien verloopt anodisch oplossen van metaal gecontroleerder, regelmatiger en sneller.

Als factoren die voor micro-ECM nog meer van belang zijn, moeten worden genoemd: stroomintensiteit, spoeling en elektrolytzuiverheid, instelparameters en soort en samenstelling van het werkstukmateriaal. Wat dat laatste betreft speelt het verschijnsel mee van preferentieel oplossen. Aanbrengen van scherpe microstructuren in of op een oppervlak (20-50 μm) is een belangrijk toepassingsgebied voor deze – volop in ontwikkeling zijnde – alternatieve techniek nu en in de toekomst.

Recent is ECF – numeriek gestuurd Electro Chemisch Frezen met al of niet geprofileerde, roterende elektrode (kathode,



Afbeelding 11. Micromengkamer (25 μm breed, diep 100 μm) als voorbeeld van ongekende ECF-potenties. (Foto: ECMTEC)

de, tussen \varnothing 2-500 μm , voedingssnelheid \pm 1 $\mu\text{m/s}$) – als innovatieve praktische mogelijkheid op de markt gekomen. Op de speciale micromachine (zie Afbeelding 10) voorzien van een digitale generator zijn met standaardgereedschapvormen, slijtagevrij, scherpbegrensde, complexe 3D-contouren direct in slijtvast materiaal aan te brengen; zie Afbeelding 11. Micrometergrote structuren – begrensd in afmetingen door het pulsvermogen – zijn met nanometerprecisie te contouren, claimt de firma ECMTEC (start-up van de Universiteit van Stuttgart). Middels ultrakorte pulsen kan gebruik worden gemaakt van de dubbele grenslaag en kan de voorinstelbare werkspleet tot het honderdvoudige worden teruggebracht. Ook valt te denken aan uiterst dunne, slanke wandjes, gatenpatronen, spuit- of extrusie-mondjes (matrix), microstempels/vertandingen en -spuitgietinzetstukken.

Auteursnoot

Jan Wijers is freelance journalist te Eindhoven, gespecialiseerd in productietechnieken.

Referentie

[1] H.S.J. Altena, Precision ECM by process characteristic modelling, Ph.D. Thesis, Glasgow Caledonian University, 2000.

Informatie

www.ecm-technologies.nl
www.pemtec.de
www.ecmtec.com
www.braincenter.nl
www.cirp.net