

VONKEROSIE

M. Mulder
Technisch-Fysische Laboratoria
Universiteit Groningen

Beschrijving in algemene zin van het vonkeroderen en de mogelijkheden ervan, in het bijzonder het vervaardigen van metaal-preparaten geschikt voor elektronen-microscopisch onderzoek.

Ingegaan wordt op de structuurveranderingen in het metaaloppervlak die, zij het in geringe mate, ook tijdens het vonkeroderen ontstaan; er worden hierbij drie zones onderscheiden.

In deze tijd waarin de machines de plaats hebben ingenomen van het vroegere handwerk, heeft nu ook vonkerosie zijn intrede gedaan. Wetenschappelijk weet men reeds lange tijd dat door vonkoverslag materiaal verwijderd kan worden.

Men ontdekte dit, omdat de levensduur van bougies en schakelcontacten aanzienlijk verkort werd door elektrode-erosie. De wetenschap heeft dan ook ijverig gezocht naar materialen die minder aan deze slijtage onderhevig zijn. De Rus Lasarenko kwam toen op het idee om het verschijnsel erosie juist te gebruiken. Hij was het dan ook die de vonkontlading het eerst heeft gebruikt om doelgericht materiaal te verwijderen.

Het heeft nog tot 1954 geduurd voordat de eerste machines op de markt kwamen.

Onder vonkerosie verstaat men nu het verspanen van materiaal door middel van herhaalde vonkoverslag. Als er een elektrische spanning aangelegd wordt tussen twee geleiders welke in een diëlectricum (isolerende vloeistof) geplaatst zijn, zal er doorslag optreden, indien er een bepaalde veldsterkte is opgebouwd. Deze doorslag treedt op als de veldsterkte tussen de twee geleiders een kritische waarde heeft bereikt.

Of in formulevorm:

$$F = Uc/x \text{ in volt/meter,}$$

hierin is F de veldsterkte, Uc de geleverde spanning (constant) en x de afstand tussen de twee geleiders.

Als x groot is, is de veldsterkte klein, dus hoe kleiner x is, hoe groter F . Op een bepaald moment zal de doorslagveldsterkte bereikt worden.

Is de toegevoerde energie nu groot genoeg, dan zal ter plaatse van vonkoverslag een kratertje ontstaan. Door nu vele ontladingen per tijdseenheid te verkrijgen, kopieert de ene geleider (elektrode) zich in de andere geleider (werkstuk).

Het tijdsverloop van zo'n ontlading kan variëren van 0.01 μsec tot 2000 μsec .

In het korte tijdsbestek van zo'n ontlading vindt er een ingewikkeld proces plaats. Dit proces kan in de volgende stadia worden verdeeld:

– een ontsteekfase. Door ionisatie ontstaat een geleidende baan, het z.g. vonkkanaal.

– de ontlading begint, waarbij hoge stroomdichtheden en hoge veldsterkten optreden. De temperatuur stijgt nu zodanig, dat het werkstuk en elektrode-materiaal verdampt en/of smelt.

– het eindigen van de ontlading. Deze wordt kunstmatig verkrege door de spanning over werkstuk te verlagen. De materiaaldeeltjes worden nu d.m.v. het diëlectricum verwijderd.

Voordelen van vonkverspanen t.o.v. conventioneel verspanen zijn:

– ieder materiaal, mits het elektrisch geleidend is, kan bewerkt worden. De hardheid en trekvastheid hebben op de bewerking geen invloed.

– doordat op het werkstuk geen krachten worden uitgeoefend (elektrode komt niet met het werkstuk in aanraking) worden geen spanningen in het werkstuk geïntroduceerd. Eveneens zal er geen braamvorming optreden, zodat deze techniek uitermate geschikt is voor dunne materialen.

– ook kunnen, in tegenstelling tot de conventionele manier, alle geometrische vormen worden gemaakt. Toch heeft deze manier van verspanen ook nadelen. Eèn hiervan is, dat de elektrode aan slijtage onderhevig is, wat tot gevolg heeft, dat voor een bewerking meer dan één elektrode nodig is.

Deze slijtage ontstaat door verschillende oorzaken:

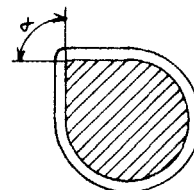
1) Bij het vonken van gaten met scherpe hoeken zal zich in deze hoeken vuil ophopen. Dit vuil, verspaand materiaal is geleidend. Tussen het opgehoopte vuil en elektrode zal nu een vonkspleet ontstaan welke even groot is als de vonkspleet bij een plat vlak.

2) Bij een elektrode met scherpe hoeken zal door deze hoeken meer materiaal verspaand moeten worden. Bij deze hoeken zal dan ook meer slijtage optreden dan op de platte vlakken, figuur 1.

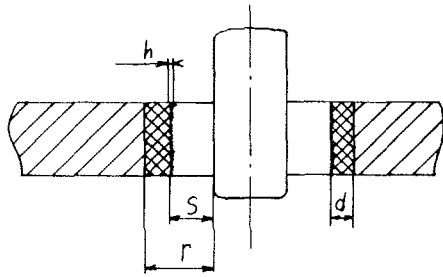
3) De materiaalkeus van de elektrode is eveneens van invloed op de slijtage. Het ene materiaal is veel minder aan slijtage onderhevig dan het andere.

In het algemeen zijn materialen met een hoog smeltpunt en een hoog warmte-geleidingsvermogen geschikte elektrode-materialen.

De relatieve slijtage van enige elektrode-materialen ten opzichte van gereedschapsstaal geven een indruk: wolfram 0,5-2%, grafiet 1-5%, koper 1-5% en messing 25-60%.



Figuur 1. Doorsnede van een vonkelektrode. De scherpe hoek ondergaat de meeste slijtage.



Figuur 2. s vonkspleet. h ruwheid. d beïnvloedingszone. r beïnvloedingsstraal.

4) Ook de ontladingstijd is van invloed op de slijtage. Bij langdurige ontlading ($> 4 \mu\text{sec}$) blijkt van de kathode meer materiaal verspaand te worden dan van de anode. Is in dit geval de elektrode negatief, dan zal er veel elektrodeslijtage optreden. Om nu tot een goede verspaningsverdeling te komen tussen werkstuk en elektrode moet van polariteit worden gewisseld.

5) Van invloed op de elektrode-slijtage is ook de spoelsnelheid. Is deze spoelsnelheid te hoog of te laag dan heeft dit ook ongunstige werking op de slijtage.

Door deze elektrode-slijtage krijgt de te vonken vorm een andere vorm dan oorspronkelijk de bedoeling was. Bij doorgaande gaten speelt deze slijtage geen rol omdat bij voldoende doorvoering van de elektrode de slijtage opgeheven kan worden.

Bij blinde gaten dient echter meer dan één elektrode gebruikt te worden. De voorberekingselektrode neemt men dan twee maal de beïnvloedingsstraal, figuur 2, kleiner dan de nabewerkingselektrode. Dit om van het schoonvallen van de wand zeker te zijn.

Nu komen we op een tweede nadeel van het vonkverspanen: het ontstaan van de vonkspleet.

Dikwijls vergeet men dat vonkverspanen een verspanende techniek is en het verspaande materiaal verwijderd moet worden.

De enige weg welke dit materiaal kan gaan is langs de elektrode. Maar doordat dit materiaal nog geleidend is, zal het steeds contact maken met de wand en de elektrode. De vonkspleet zal dan zo groot worden, dat het verspaande materiaal ruim tussen elektrode en wand langs kan.

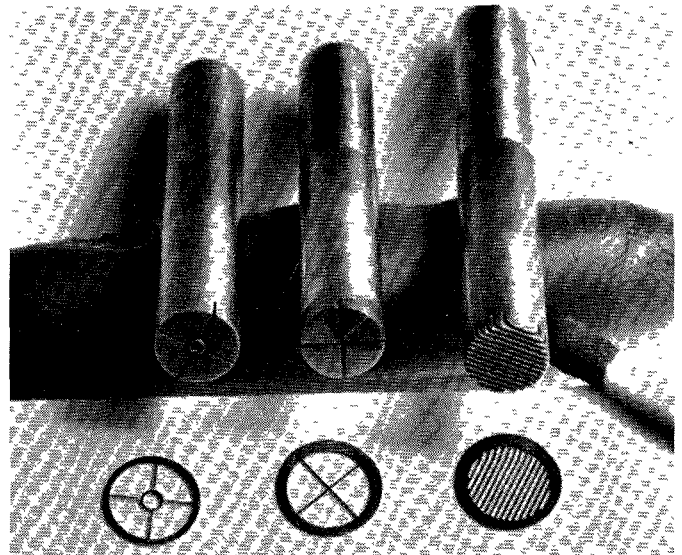
Dit verspaande materiaal is een bron van onnauwkeurigheid. Om vonkdoorslag op ongewenste plaatsen zo klein mogelijk te maken, dient dit materiaal dan ook zo snel mogelijk verwijderd te worden.

Een te lange aanwezigheid zal alleen maar leiden tot spleetvergroting. Dit is dan ook één van de taken van het diëlectricum. Dit spoelen met het diëlectricum kan op verschillende manieren uitgevoerd worden.

Figuur 3 geeft hiervan enkele voorbeelden. De voorbeelden uit deze figuur zijn alle uitgevoerd onder dezelfde werkomstandigheden. Als diëlectricum is kerosine gebruikt. De openspanning was 250 V, condensator-waarde 15 nF, pauzetijd 8 μsec .

Het eerste wat opvalt is dat bij alle voorbeelden het gevonkte gat conisch is. Dit is te verklaren doordat de elektrode ook aan de zijkant vonkt.

Daarom zal het ook wel duidelijk zijn dat boven in de vonkspleet meer deeltjes passeren dan er onder ontstaan. Ook hebben de verspaande deeltjes nog de eigenschap om samen te klonteren.



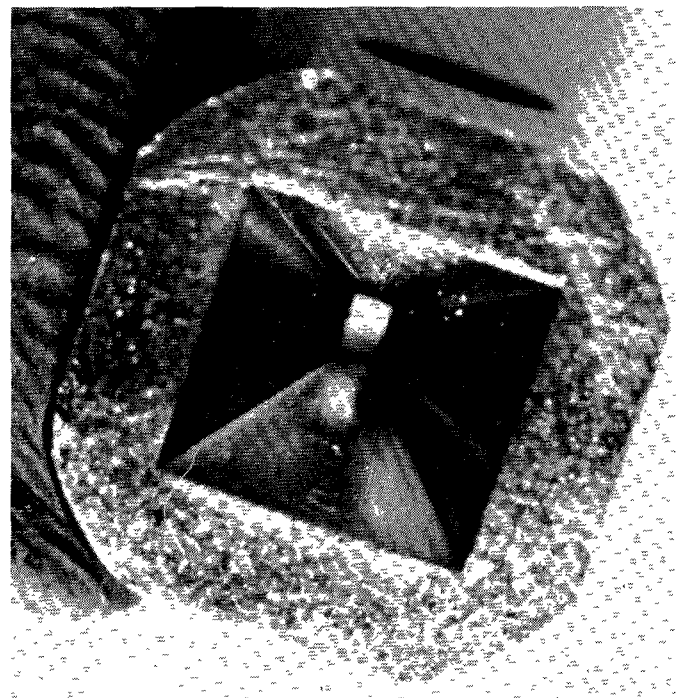
Onderdelen welke met behulp van zinkeroderen tot stand zijn gekomen. Van rechts naar links:

1. Een opdampmasker waarvan de roosterbreedte 0,2 mm is en de draaddikte 0,08 mm. Materiaal is messing van 0,5 mm dik.

2. Uitricht-diafragma waarvan de draad dikte 0,08 mm is. Materiaal is messing.

3. Kruisdraad waarvan de draaddikte 0,08 mm is. Materiaal is messing.

De gebruikte elektroden zijn van koper en met behulp van draadvonken tot stand gekomen.



Het gevonkte onderdeel is een golfpijpje van niobium. De conus gaat over in een rechthoekig gat van $1,3 \times 0,62$ met een lengte van 6 mm.

De afmetingen van het gat hebben een tolerantie van $\pm 0,01$ mm. Om tot dit resultaat te komen is het gat voorgeboord op $\varnothing 0,5$ mm en daarna op maat gevonkt in twee trappen. Als elektrodemateriaal is wolfram gebruikt.

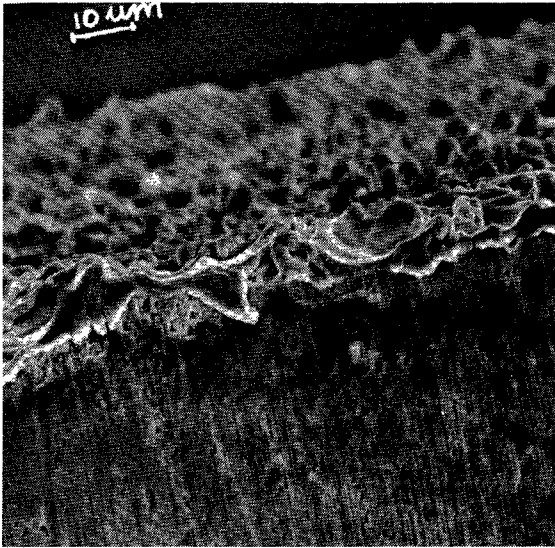


Foto 1. Materiaal is messing dat verspaand is met een koper-elektrode. De witte zone is $\pm 10 \mu\text{m}$. Vergroting 1000 \times .

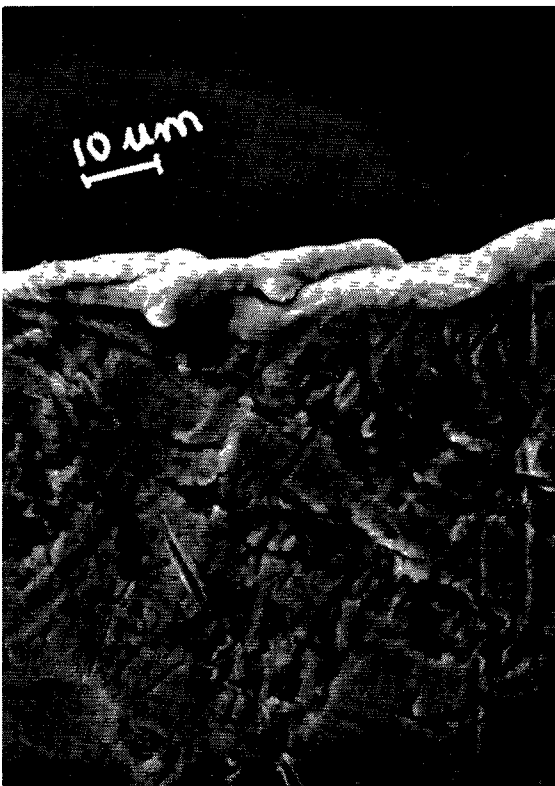


Foto 2. Materiaal is staal dat verspaand is met een koper-elektrode. De witte zone is $\pm 8 \mu\text{m}$. Vergroting 1000 \times .

Alle voorbeelden zijn gevonkt onder dezelfde werkomstandigheden. Openspanning 250 V, condensator waarde 15 nF en de pauzetijd 8 μsec .

De opnamen van de metaalpreparaten zijn gemaakt met de J.S.M.-U3 aftast-elektronenmicroscop van de afdeling Fysische Metaalkunde door de heer U. B. Nieborg, die ook verdere medewerking verleende aan dit artikel.

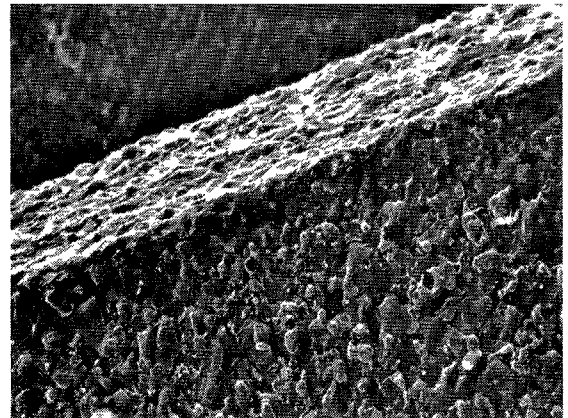


Foto 3. Materiaal is Niobium waarvan twee vlakken haaks gevonkt zijn met behulp van draadvonken. Gebruikt werd een koperdraad van 0,1 mm. Vergroting 300 \times .

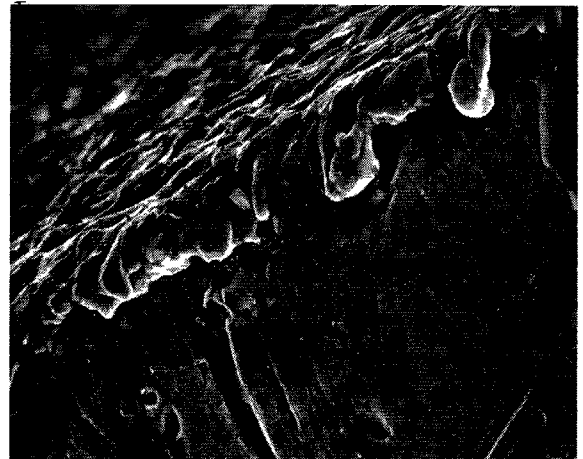


Foto 4. Materiaal is Niobium dat verspaand is met een koperdraad van 0,1 mm. De witte zone is $\pm 12 \mu\text{m}$. Vergroting 1000 \times .

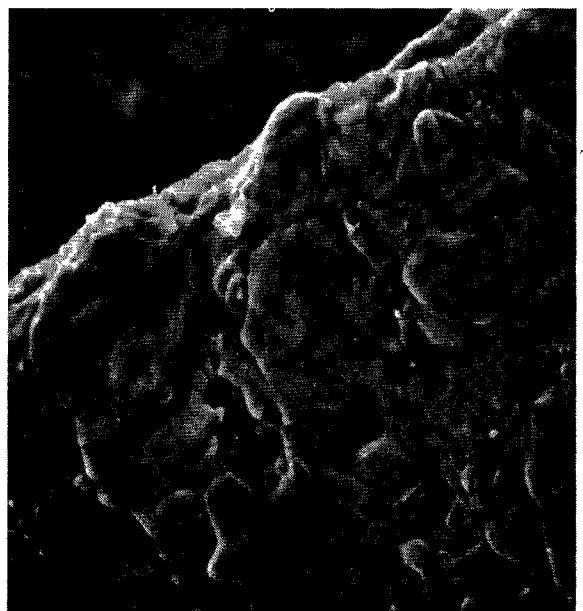


Foto 5. Materiaal is Niobium dat met een koperdraad van 0,1 mm is verspaand en daarna vlakgevonkt met een ronddraaiende elektrode. In het materiaal zijn krimp-scheuren ontstaan die zich echter alleen in de witte zone bevinden. Vergroting 1000 \times .

Dit laatste wordt in de hand gewerkt door het gekraakte dielectricum.

Het snel afvoeren van het verspaande materiaal kan dus ook belangrijk zijn om consisiteit te voorkomen.

Bij voorbeeld B worden de deeltjes het snelst afgevoerd. Dit is dan ook de *snelste* werkmethode.

Toch is het gevonkte gat nog vrij conisch. Ook zijn de kanten niet meer helemaal recht.

Dit is te verklaren doordat het dielectricum bij hogedrukspoeling moeilijk om de hoeken komt bij hoekige elektroden, waardoor bij de hoeken minder spoeling optreedt. Een te hoge spoelsnelheid werkt deze vonkspleetafwijking eveneens in de hand.

Het beste resultaat krijgt men bij een niet te snelle constante spoeling.

Spoelmethode D benadert dit het best. Bij deze werkmethode is de conusvorming het kleinst en de kanten zijn recht.

Bij het zuigend afvoeren (spoelmethode C) van het dielectricum treedt nog een ander nadeel op. Bij deze manier worden nl. gasbellen ($H_2 + O_2$) afgezogen.

Dit gas zal zich ophopen in het hoogste punt van de slangen. Dit opeenhopen van gas (knalgas) kan een ontploffing tot gevolg hebben.

De verhouding van de verspaningstijden van de spoelmethoden van figuur 3 onder deze werkomstandigheden is: A:B:C:D = 9:5:7:6. De methode B geeft dus de beste verspaningsresultaten.

Teruggaand naar Figuur 2 is te zien dat na de vonkspleet een beïnvloedingszone in het materiaal ontstaat.

Deze zone ontstaat omdat tijdens de ontlading de toegevoerde energie het materiaaloppervlak verhit. Deze ontwikkelde warmte dringt in het materiaal door en brengt het tot zekere diepte tot smelten of tot verdamping.

Doordat het verwijderen van het materiaal nu in damp- en in gesmolten vorm plaats vindt, ondergaat het materiaal een structuurverandering. Deze verandering kan men verdelen in drie gebieden:

Zone 1 'De witte zone'

Op de plaatsen waar het materiaal vloeibaar is geweest, wordt bij iedere ontlading een gedeelte van dit materiaal verwijderd; hierdoor ontstaan vele kratertjes. Het materiaal dat achterblijft zal na de ontlading stollen.

De dikte van deze laag is afhankelijk van de energie die gebruikt wordt. Wordt per ontlading veel energie gebruikt, dan krijgt men een diep smeltgebied. De kraters zullen dan groot zijn.

Uit gedane proeven is gebleken dat de dikte van de smeltlaag ongeveer gelijk is aan de ruwheidshoogte van het gevonkte oppervlak. De diepte van het smeltgebied is afhankelijk van het materiaal dat verspaand wordt.

Bij materiaal met een goed geleidingsvermogen is dit smeltgebied aanmerkelijk groter dan bij materiaal met een slecht geleidingsvermogen.

Zone 2 'De overgangszone'

Deze laag heeft blootgestaan aan een hoge temperatuur en is enigszins vloeibaar geweest. De kans is groot dat in deze laag de chemische samenstelling veranderd is.

Electrode-atomen en gekraakte dielectricum moleculen kunnen in het materiaal diffunderen.

Ook is de kans groot dat in deze eerste twee lagen scheurvorming optreedt bij het werken met een hoge stroomsterkte. Bij het bewerken van zacht materiaal heeft men hier echter minder hinder van dan bij hardere soorten materiaal.

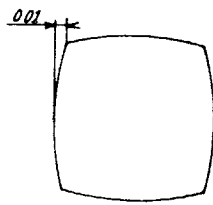
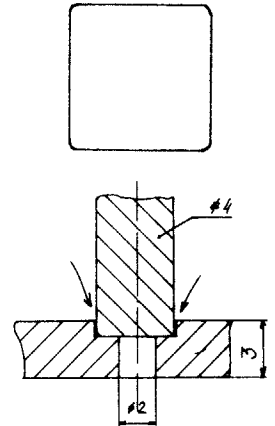
Zone 3 'De zone waar spanningen ontstaan'

Deze laag ligt onder de gesmolten laag. Dit gebied wordt bij vonkontlading warm waarbij het materiaal uitzet.

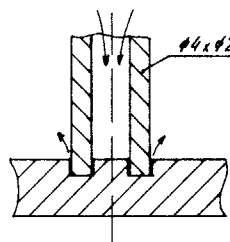
Na de ontlading koelt het af en gaat weer krimpen. Zo wordt dit gebied steeds weer door druk belast en ontstaan er spanningen in het materiaal.

In vele gevallen is dit gebied mistens 0.1 mm diep.

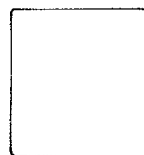
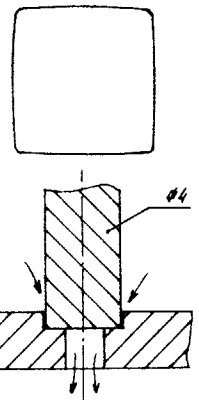
A. *Natuurlijke spoeling; geen afzuiging. Dubbele vonkspleetbreedte: onder 0,03 mm en boven 0,07 mm. De hoeken van het gat zijn afgerond.*



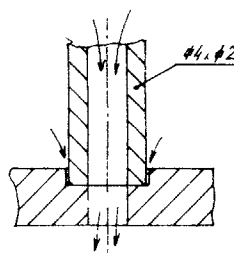
B. *Hogedruk-spoeling. Dubbele vonkspleetbreedte: onder 0,03 mm en boven 0,07 mm. De rechte kanten van het gat zijn niet vlak; de hoeken zijn afgerond.*



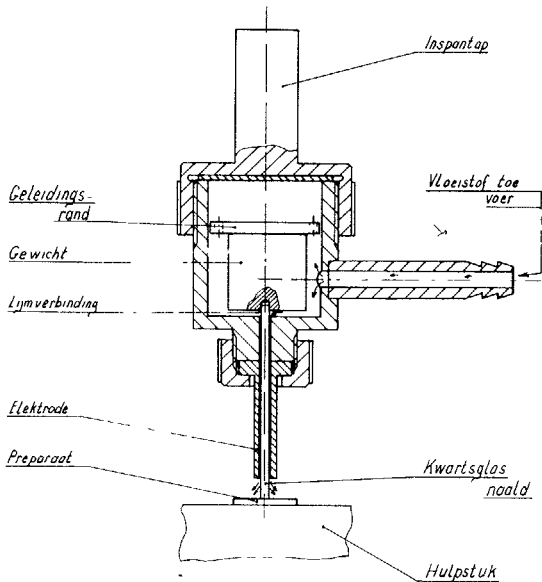
C. *Natuurlijke spoeling en afzuiging. Dubbele vonkspleetbreedte: onder 0,02 mm en boven 0,06 mm. De rechte kanten van het gat zijn redelijke recht; de hoeken zijn afgerond.*



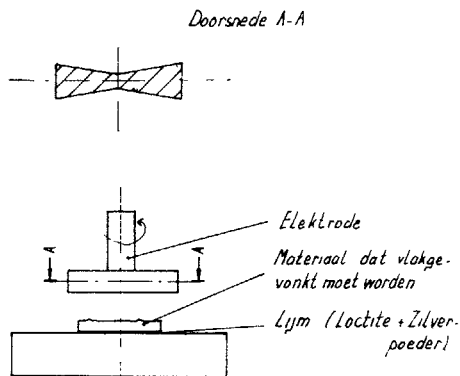
D. *De elektrode wordt om de 60 seconde gelift en er wordt voortdurend afgezogen. Bij het liften is er een interval met hogedrukspoeling. Dubbele vonkspleetbreedte: onder 0,01 mm en boven 0,05 mm. De hoeken van het gat zijn afgerond.*



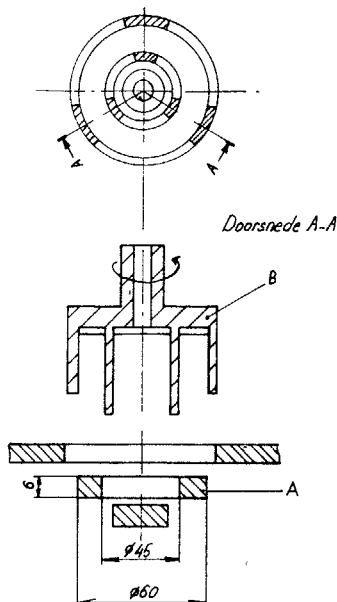
Figuur 3. Verschillende spoelmethoden. De elektroden zijn van koper; het werkstukmateriaal is messing. Alle maten in millimeters.



Figuur 4. Inrichting voor het uitvonken van een dun preparaatplaatje.



Figuur 5. Koperen elektrode die door het ronddraaien het preparaatje vlak vonkt. De elektrode is aan de zijkanten weggenomen.



Figuur 6. B is de, opengewerkte, koperen elektrode welke bij het bewerken ronddraait. Plaat A, van gereedschapsstaal, kan op deze wijze snel worden gevonkt. Ook heeft men nu minder afwijking van de vorm dank zij de betere spoeling.

De bewerkingen die men d.m.v. vonkverspanen kan uitvoeren zijn van velerlei aard. Men kan onderscheiden:

- erosief slijpen
- erosief draadvonken (Mikroniek mei 1977)
- erosief kogels vonken (Mikroniek mei 1977)
- zink-eroderen.

Deze laatste bewerking is de meest gecompliceerde. Op deze manier kunnen willekeurig geprofileerde gaten van allerlei vormen verkregen worden. Er kunnen gaten gevonkt worden van groot tot klein. Bij microvonkverspanen is het zelfs mogelijk gaatjes te vonken van $4 \mu\text{m}$.

Onder dit zinkeroderen valt ook het maken van preparaten die gebruikt worden als onderzoek-objekt in een elektronenmicroscoop.

Een voordeel van het maken van preparaten op deze manier is het feit dat in het preparaat een minimum aan spanning ontstaat. Dit laatste is een vereiste, want de spanningen die toch nog ontstaan zullen door wegetsen van het materiaal verwijderd moeten worden.

Moet nu een preparaat van $\phi 3 \text{ mm}$ gevonkt worden uit een plaatje van 0.5 mm dikte, dan wordt dit gedaan met een holpijpje met een inwendig gat van $\phi 3 \text{ mm}$. In dit geval gaat het dus niet om het te vonken gat, maar om het materiaal dat uit zo'n gat komt.

Het probleem doet zich dan voor, dat bij het doorkomen van de elektrode het uit te vonken materiaal omhoog wil komen en contact gaat maken met de elektrode. Het resultaat zal zijn dat het gevonkte preparaat ovaal gaat worden, en als preparaat slecht bruikbaar is.

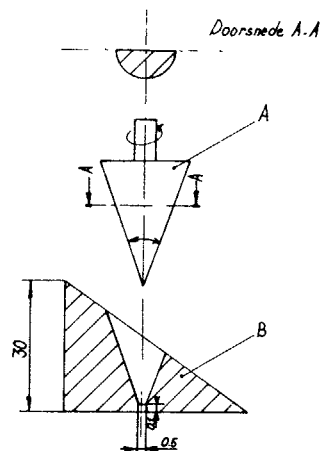
Dit probleem is op twee verschillende manieren op te lossen. De eerste manier is: op het preparaat door het holpijpje heen een staafje kwarts-glas van $\phi 2.5 \text{ mm}$ te plaatsen met daarop een gewichtje.

Het staafje kwarts met gewichtje zorgt er nu voor dat het materiaal niet omhoog kan komen.

Wel moet het te verspanen materiaal op een vlakke ondergrond liggen; dit om te voorkomen dat het preparaat uit het moedermateriaal geduwd wordt, wat tot gevolg heeft, dat er braamvorming ontstaat.

Het werken met een kwarts-staafje met daarop een gewichtje biedt ook nog het voordeel dat het materiaal niet meer op een andere wijze opgespannen behoeft te worden.

Zo kan er uit een plaatje van $\phi 5 \text{ mm}$ zonder problemen een preparaat van $\phi 3 \text{ mm}$ gevonkt worden. Het kwarts-staafje met gewicht houdt het plaatje van $\phi 5 \text{ mm}$ goed op zijn plaats.



Figuur 7. A is de, half weggenomen, koperen elektrode. B is een messingwerkstuk, bedekt met een spiegelende goudlaag die niet mocht beschadigen. Bij het vonken van de conus wordt met een draaiende elektrode gewerkt. Het laatste wordt het ronde gaatje van $0,5 \text{ mm}$ gevonkt met een stilstaande elektrode.

Het op deze manier vonkverspanen wordt op bovengenoemd instituut veel toegepast, Figuur 4. (idee Ir. D. J. Verel).

De tweede manier voor het verkrijgen van preparaten is om het te verspanen materiaal vast te lijmen. Nu kan het preparaat ook niet in de holpijp omhoog komen. Maar het probleem is, dat lijm als isolator gaat werken. Dit is op te lossen door aan de lijm een beetje zilverpoeder toe te voegen. Loctite leent zich daar goed voor; zilverpoeder mengt zich er goed mee. Is de bewerking voltooid, dan is het geheel los te weken in aceton.

Deze tweede manier is boven de eerste te preferen indien er materiaal bewerkt moet worden dat dikker is dan 0.3 mm. Nu kan er ook met een ronddraaiende elektrode gewerkt worden, wat resulteert in een snellere werkwijze en nauwkeuriger rond worden van het preparaat. Ook kan het materiaal dat van te voren dikwijls door middel van draadvonken vanuit staafmateriaal in plakjes gevonkt is, met een ronddraaiende elektrode vlak gevonkt worden; figuur 5.

Dit om oneffenheden, die ontstaan zijn door fluctuatie van de draad, kwijt te raken.

Natuurlijk is een ronddraaiende elektrodehouder voor meer doeleinden geschikt dan alleen preparaten vonken. Bij een ronddraaiende elektrode is een betere spoeling mogelijk, hierdoor ontstaat minder snel een vlamboog of kortsluiting, dus minder procesonderbrekingen.

Dit heeft tot gevolg dat er sneller mee gewerkt kan worden dan met een elektrode, die alleen in het verticaal vlak beweegt.

Deze manier van werken is in het bijzonder geschikt voor het vonken van grote ronde gaten op een vonkerosiemachine met een laag vermogen. Figuren 5, 6 en 7 geven hiervan enkele voorbeelden.

De draaiende elektrodehouder, zie figuur 8, die in het voorafgaande gebruikt is, is gemaakt van een draaispindel die normaal gebruikt wordt in een freesapparaat.

Het voordeel van deze spindel is, dat hij nauwkeurig gelagerd is, en dat er spantangen in passen van 0.2 t/m 8 mm.

Eveneens is beschikbaar een vaste spantanghouder, (figuur 9), welke is voorzien van een referentiehulpstuk, figuur 10.

Dit wordt gebruikt als er met meer dan één elektrode gewerkt moet worden. Wel moeten de elektroden dan voorzien zijn van een referentievlak dat evenwijdig is aan het te vonken gat. De opvolgende elektroden kunnen nu met behulp van dit referentievlak goed op elkaar worden uitgericht.

Om het geheel nu compleet te maken, kan er gebruik worden gemaakt van een optische middenpuntzoeker, figuur 11, zodat het vooraf plaats bepalen van een te vonken gat probleemloos kan worden opgelost.

Deze drie onderdelen zijn afzonderlijk en verwisselbaar, door gebruik te maken van een inspanvatting welke op de machinekolom wordt geplaatst, figuur 12.

In dit artikel is geprobeerd een indruk te geven wat vonkerosie is en wat de mogelijkheden er van zijn.

Door de vele mogelijkheden kan in de toekomst verwacht worden dat het toepassen van deze techniek zich steeds verder zal uitbreiden en dat men in veel werkplaatsen er toe zal overgaan het vonkverspanen toe te passen, zeker als de conventionele technieken geen uitkomst meer bieden.

Aanbevolen lectuur

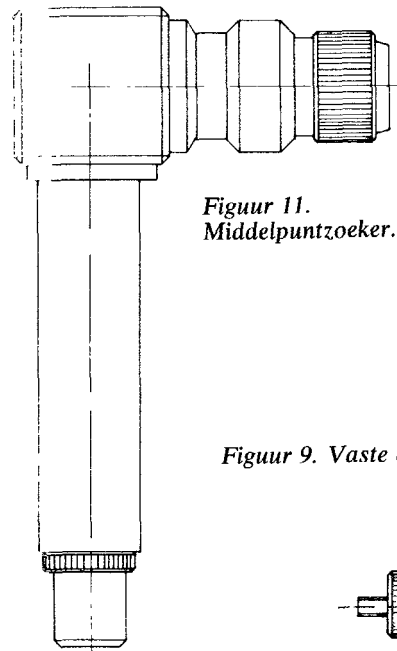
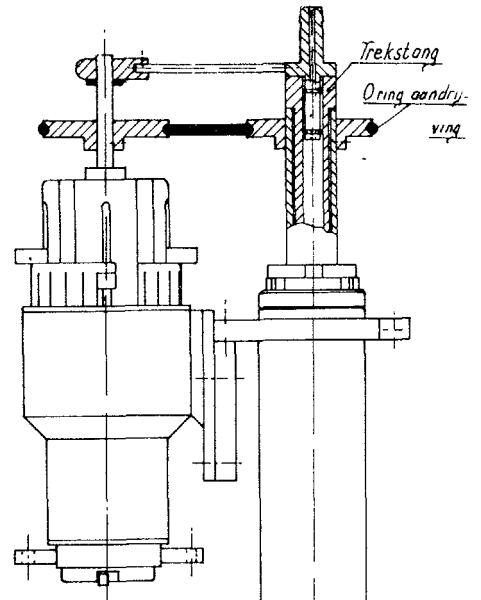
1. 'Davindson' deel 6; hoofdstuk 'Fysische- en chemische technieken'.

2. FME-bladen; blad 26 'Begrippen en technieken'.

3. C. van Osenbrugge, 'Mikrovonkverspanen'; Philips Technisch Tijdschrift, 30 (1969-1970) 6/7.

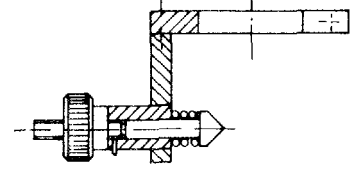
De draaispindel en de optische middenpuntzoeker, die in het artikel gebruikt worden, kunnen geleverd worden door de firma Esmeijer en Co B.V. te Rotterdam.

Figuur 8. Roterende elektrode-spantanghouder met inwendige spoeling en zijn aandrijving; totaal gewicht 0,6 kg.

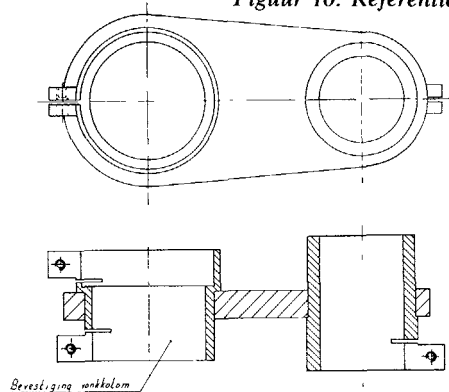


Figuur 11. Middelpuntzoeker.

Figuur 9. Vaste elektrode-spantanghouder.



Figuur 10. Referentie-hulpstuk.



Figuur 12. Inspanvatting voor de middenpuntzoeker en de elektrode-spantanghouder. Links de klembus voor de bevestiging aan de machinekolom.