

BESCHOUWINGEN OVER ULTRASOON BOREN

B. Wilms
Unitech B.V.
Baarn

Deze beschouwingen geven u een algemeen overzicht en hopelijk ook inzicht in het ultrasoon boren en de praktische toepassingen ervan zonder u een aantal formules voor te schotelen, die u weer vergeten bent voordat deze dag voorbij is.

Dit artikel is als lezing gehouden tijdens het Glastechnisch Symposium van 14 december j.l. De schetsen zijn ontleend aan de daar gebruikte transparanten voor overhead projectie.

Inleiding

Alvorens in te gaan op de techniek van het ultrasoon boren, zou ik graag eerst enkele algemene opmerkingen willen maken.

Wat is nu ultrasoon?

Het spektrum van mechanische vibratie wordt onderverdeeld in 4 groepen:

infrason gebied:	dat is het gebied onder 16 Herz.
sonoor gebied:	van 16 Herz – 16 kHz.
dan krijgen wij het ultrasoon gebied:	van 16 kHz – 1 GHz.
en vervolgens het hyperson gebied:	dat is het gebied boven 1 GHz (gigahertz) (10 ⁹).

De grens van het sonore gebied heeft men afgestemd op het gemiddelde bereik van het menselijk oor. Willen wij nu trillingen, dat wil zeggen frequentie, gebruiken voor doeleinden als ultrasoon reinigen, ultrasoon boren of ultrasoon kunststoflassen, dan zullen wij een frequentie moeten kiezen die boven dit sonore gebied ligt, dus boven de 16 kHz.

Aangezien jonge mensen en kinderen vaak boven 16 kHz. kunnen horen heeft men in de praktijk de laagste grens gesteld op ca. 18 kHz. De meeste ultrason boormachine en kunststoflasmachines werken echter op 20 kHz. De ultrasonereinigingsinstallaties werken meestal op 20, 25, 40 en 50 kHz.

Ultrasoon boren

Het principe van het ultrasoon boren berust op de gebruikmaking van de mechanische trillingen die onderaan de sonotrode plaats vinden. Een slijpmiddel, in suspensie gebracht in een vloeistof wordt tussen de sonotrode en het werkstuk gespoten. De trillingsenergie wordt overgebracht op de korrels van het slijpmiddel die in dezelfde richting vibreren als de sonotrode, dus longitudinaal.

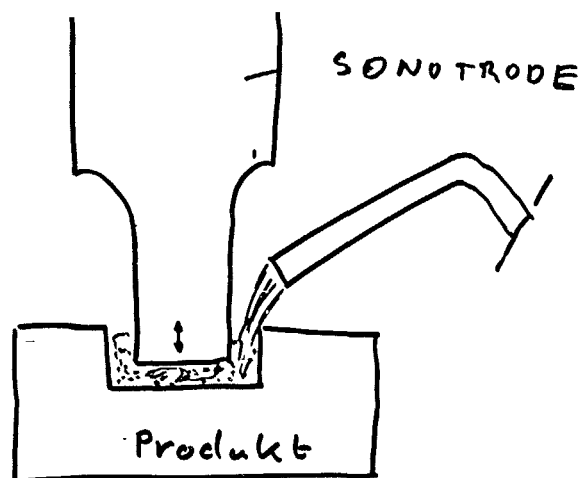
Het hameren van de slijpdeeltjes op het oppervlak van het te bewerken voorwerp haalt materiaal weg door de erosie die ontstaat. De sonotrode, waarvan de beweging onzichtbaar is voor het oog, penetreert in het voorwerp onder een lichte continue druk, die erop uitgeoefend wordt door middel van gewicht. Het ultrasoon boren is een techniek die het mogelijk maakt om gaten met een willekeurige vorm in harde en brosse materialen te maken, welke met conventionele methodes moeilijk of nauwelijks te realiseren zijn.

Een onderverdeling van een boormachine is als volgt te geven:

- 1) een generator die de ultrasonere frequentie opwekt.
- 2) een trilelement dat de ultrasonere frequentie omzet in mechanische trillingen.
- 3) een mechanische versterker die de trilling, die vanuit het trilelement komt, versterkt.
- 4) een sonotrode die gemaakt wordt aan de hand van het te bewerken produkt.



Foto 1. Hr. B. Wilms.



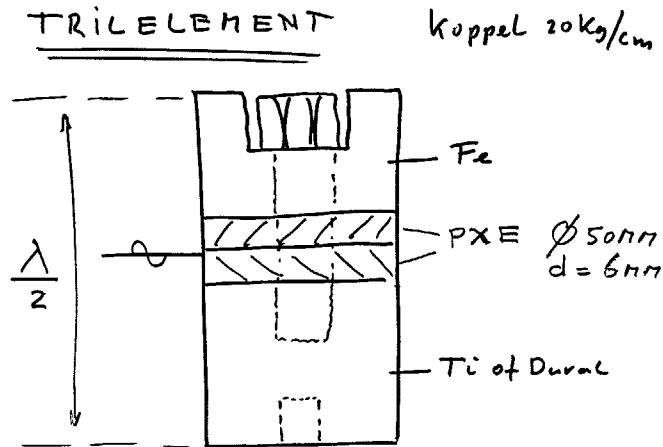
Het trilelement met mechanische versterker en sonotrode noemen we samen de electro-acoustische omvormer.

Als wij deze onderdelen nu nader bekijken dan kunnen wij over de generator het volgende opmerken:

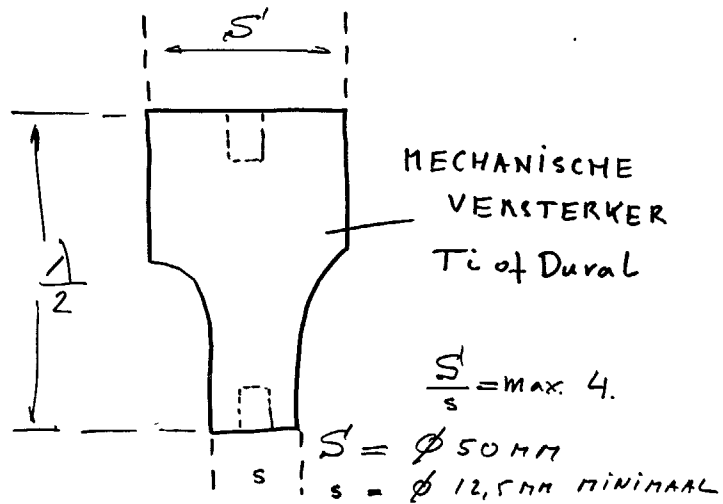
De generatoren die momenteel gebouwd worden zijn praktisch alle uitgerust met transistoren. In de generator bevindt zich een oscillator-kring, die is af te stemmen op de mechanische resonantie van de electroacoustische omvormer. Dit afstemmen van de frequentie geschiedt door een afstemknop met meter, waarbij een minimum dip moet worden gezocht. Een terugkoppelspoel in de generator zorgt voor een automatische frequentie-afstemming als de generator wordt belast door het boren.

De laatste jaren worden er praktisch alleen nog generatoren gebouwd van het type INCREASING dat wil zeggen dat de

generator meer vermogen gaat geven, naarmate de belasting groter wordt. Dit heeft tot gevolg dat de eenmaal ingestelde amplitude onderaan de sonotrode altijd gelijk blijft, hetgeen gelijkmatige en reproduceerbare boorresultaten geeft. Uiteraard moet de generator een vermogensregeling hebben om die amplitude in te stellen afhankelijk van het te boren produkt en de gewenste resultaten.



2) Het tweede onderdeel is de mechanische versterker die uit Dural of uit Titaan wordt gemaakt. Deze mechanische versterker is door middel van een draadeind met het piezo-elektrisch trilelement verbonden.



Electro-acoustische omvormer

De electro-acoustische omvormer heeft als doel de elektrische hoogfrequente energie om te zetten in een mechanische vibratie van voldoende sterkte, zodat de amplitude groot genoeg is om voor het ultrasoon boren te gebruiken.

De electro-acoustische omvormer bestaat uit 3 gedeeltes:

1) Een piezo-elektrisch trilelement bestaande uit 2 lood-zirconaat-titanaat schijven, afgekort P.Z.T. met een hoog rendement. Deze keramische schijven zijn voorgespannen tussen twee metalen delen om een longitudinale vibratie van 20 kHz te verkrijgen, waarbij radiale of transversale vibraties worden uitgesloten.

De voorspanning bedraagt ca. 20 kg/cm bij schijven met een diameter van 50 mm. Het geheel is afgestemd op een halve golflengte van 20.000 Herz.

de werking van het trilelement moet u eigenlijk zien als de omgekeerde werking van een pick-up element. Bij een pickup brengen we door de hobbeltjes op de plaat een piezoelektrisch trilelementje in trilling. Hierdoor wordt een elektrische spanningje opgewekt, dat wordt versterkt, waardoor geluid wordt verkregen. Bij een ultrasoon trilelement werken we precies andersom, we voeren namelijk hier een spanning toe waarbij het element gaat trillen. Men noemt dit dan ook het omgekeerd piezo-elektrisch effect.

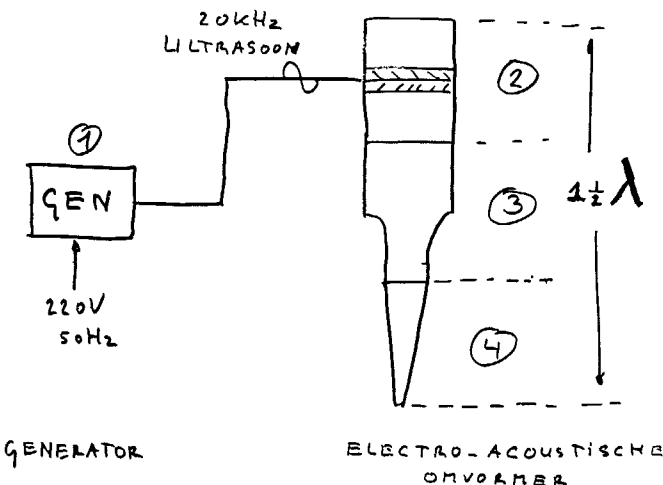
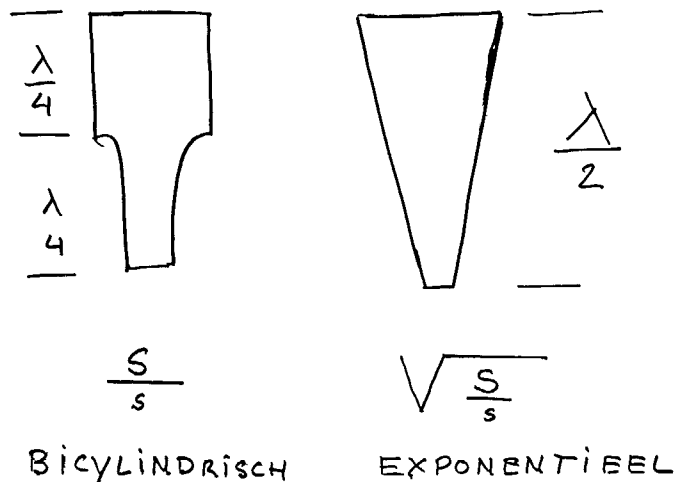
De versterker dient ervoor om het signaal, dus de mechanische trilling, die onder van het piezo-elektrische trilelement komt, te versterken. De versterkingsfactor, dat is de verhouding oppervlak grote S kleine s mag echter nooit hoger zijn dan 4, daar anders het risico van scheuren door te hoge mechanische spanningen groot is.

Als grote S maximaal Ø 50 is dan mag kleine s dus niet kleiner zijn dan 12,5 mm. In de praktijk kiest men echter de versterkingsfactor nooit groter dan 2. Dit doet men omdat de acoustische omvormer nooit ideaal is afgestemd en er meer mechanische krachten optreden dan berekend zou zijn. Die krachten treden bijvoorbeeld ook op tijdens het afstemmen van de generator als men bij het zoeken boven of onder de juiste resonantiefrequentie zit.

3) Als laatste deel van de totale acoustische omvormer hebben wij de sonotrode, die vaak uit titanium doch ook wel uit Dural of half gehard staal wordt vervaardigd. De vorm onderaan de sonotrode hangt af van het te bewerken onderdeel. Dit is dan ook de reden, dat men het uiteinde vaak verwisselbaar maakt.

Op figuur 5 ziet u twee voorbeelden van sonotrodes, waarbij de linker sonotrode een grotere mechanische versterking heeft dan de rechter. Voor de maximale versterkingsfactor gelden dezelfde normen als voor de mechanische versterker, die wij hiervoor bespraken.

SONOTRODES



De versterking bij een bicylindrische sonotrode is gelijk aan de verhouding $S:s$ en bij een exponentiële sonotrode is die versterkingsfactor de wortel uit $S:s$. Bij de bicylindrische sonotrode valt dan nog op te merken dat de helft van de sonotrode overeenkomt met een kwart golflengte. Onder dezelfde omstandigheden is de versterking bij de bicylindrische sonotrode dus groter dan bij de exponentiële sonotrode, maar de interne spanningen zijn bij de bicylindrische sonotrode vele malen hoger en juist op het overgangspunt van de grotere \varnothing naar de kleine \varnothing omdat wij daar een spanningsbuik hebben. Op knopen en buiken komen we later in dit verhaal nog terug.

Kiezen we vooral bij de sonotrode een te hoge versterkingsfactor, dan zal de sonotrode op dat punt scheuren. Om reden dat de mechanische spanningen hoog zijn kiest men bij een hoge versterkingsfactor over het algemeen titanium als materiaal. Zoals u weet heeft titanium een grote trekvastheid, daarbij komt dat titanium bij frequenties als 20.000 Herz, acoustisch gezien, een uitstekend materiaal is. Dat wil zeggen praktisch geen mechanische verliezen geeft. Dit is belangrijk daar anders de sonotrode te warm zou worden.

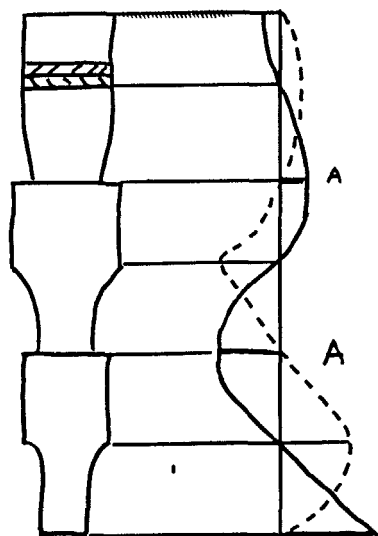
Zoals u kunt concluderen uit de voorgaande figuren is elk onderdeel exact afgestemd op een halve labda dus halve golflengte van de 20.000 Herz, dat wil zeggen dat de gehele electro-acoustische omvormer afgestemd is op $1\frac{1}{2}$ labda. Elke verbinding, dat wil zeggen trilelement-mechanische versterker en mechanische versterker-sonotrode, vindt plaats op een amplitudebuik dat wil zeggen op een spanningsknoop, waardoor de beste overgang is gekozen met de laagste of praktisch geen acoustische verliezen. Op figuur 6 ziet u de mechanische spanningen in een stippellijn weergegeven. U ziet dat de bevestigingspunten allen op een spanningsknoop liggen.

De sonotrodes zijn verwisselbaar, maar hun eigen frequentie moet altijd gelijk zijn aan de nominale frequentie van de generator dat wil zeggen 20 kHz. Afhankelijk van de toepassing, kan ook de mechanische versterker worden verwisseld om een andere versterkingsfactor te verkrijgen.

Indien men met een bepaalde amplitude werkt en men wil deze amplitude vergroten zijn er verschillende mogelijkheden:

- of wel de amplitude van de generator opvoeren, dus electrisch.

ACOUSTISCHE OMVORMER



A = Amplitude
 — = Amplitude lijn
 --- = Spanningslijn

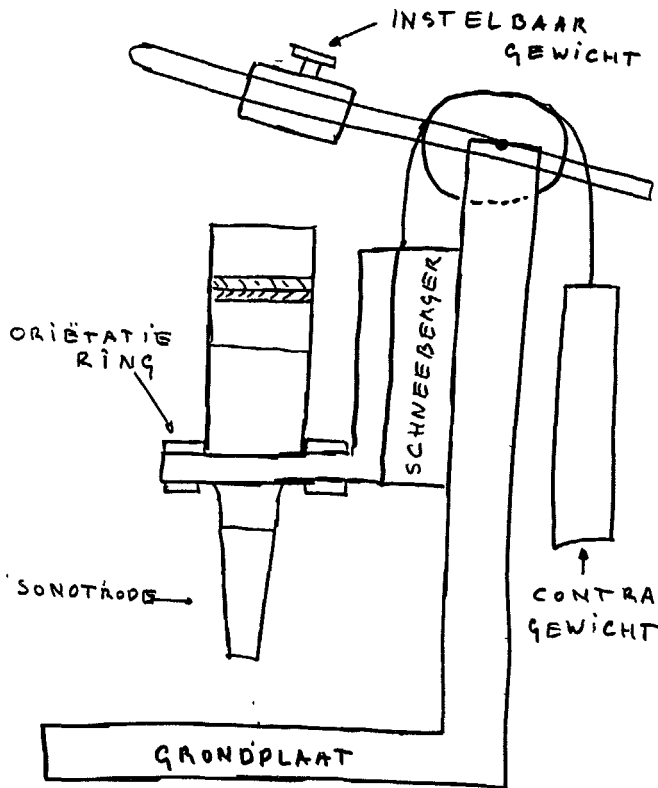
- of wel de mechanische versterker uitwisselen en daar een hogere mechanische versterking kiezen,
- of wel een grotere versterking zoeken in de sonotrode.

Over het algemeen, en dat is ook de meest eenvoudige wijze, verandert men de amplitude in de generator. De Amplitude die onder aan de sonotrode gevonden wordt kan bij hoge versterkingsfactoren wel 100 à 150 micron uitslag bereiken. Een gemiddelde waarde is ca 50 micron.

Eén van de volgende onderdelen die deel uitmaakt van de machine is een verticaal verplaatsingsmechanisme. Aan dit verticaal verplaatsingsmechanisme is de electro-acoustische omvormer bevestigd via een oriëntatiering, zodat het mogelijk is om bij bepaalde boorvormen die geen symmetrie-as hebben, de sonotrode te verdraaien.

De oriëntatiering is bevestigd aan een stevig hoekprofiel wat aan een Schneeberger geleidingsrail is gemonteerd. De precisie van een dergelijk geleidingssysteem moet hoog zijn en ligt veelal in de buurt van 1 micron bij een slag van 100 mm, hetgeen bij het ultrasoon boren waar een beetje precisie wordt gevraagd, zeker noodzakelijk is.

Een contragewicht houdt het verticaal verplaatsingsmechanisme in evenwicht en een hefboom met verstelbaar gewicht geeft de mogelijkheid om de juiste druk op het te bewerken onderdeel in te stellen. Het is nuttig om op de machine een direkt afleesbare micrometer te hebben, die de boordiepte aangeeft. Op de grondplaat kan een bak met rondpompsysteem voor het slijpmiddel en het te bewerken onderdeel geplaatst worden, eventueel met een positioneringssysteem of XY tafel.



Nu wij de diverse onderdelen van de boormachine separaat behandeld hebben zullen we eens kijken naar de werking van het geheel.

Wij hebben al gezien dat de generator een frequentie afgeeft die ca. 20.000 Herz is met een bepaald vermogen. Het vermogen wordt toegevoerd, zoals we gezien hebben, aan de piezoelektrische schijven, die de elektrische spanning omzetten in de mechanische vibratie. De mechanische vibratie die we dan onderaan het trilelement krijgen ligt in de orde grootte van 2 à 5 micron.

Deze trilling is echter te laag om direct aan een sonotrode toe te voeren. Daarom wordt deze trilling eerst versterkt in de mechanische versterker. De aldus verkregen trilling wordt daar opnieuw versterkt afhankelijk van de vorm van de sonotrode die bicylindrisch of exponentieel kan zijn.

Nemen we figuur 6 weer voor ons, dan is de stippellijn de lijn die de mechanische spanning weergeeft. De amplitude wordt hier weergegeven door de gesloten lijn.

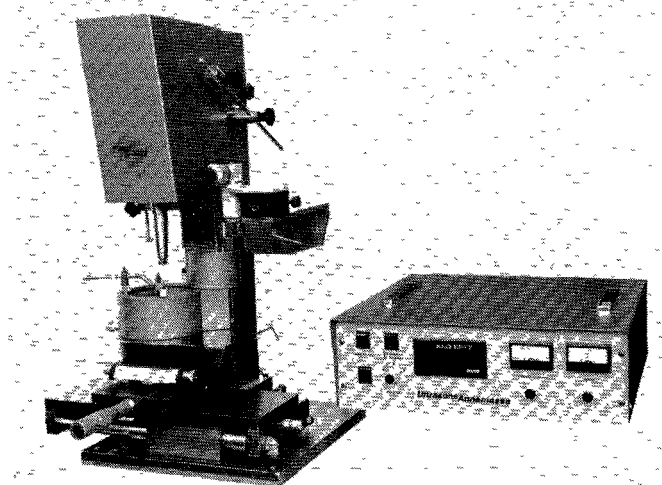


Foto 2. Ultrasonoor boormachine; op het krussupport is een rondpompsysteem voor het slijpmiddel gemonteerd. Daarnaast een generator met ingebouwde frequentiemeter die het mogelijk maakt de slijtage van de sonotrode te controleren

We zien dan ook dat de amplitude, die bij het trilelement nog klein is, steeds wordt versterkt, om onderaan de sonotrode maximaal te worden.

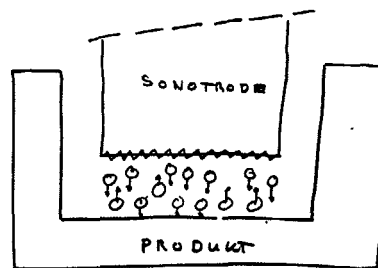
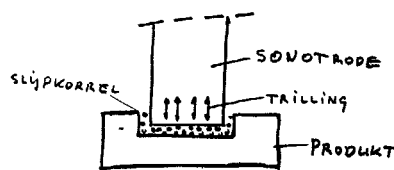
Wij zagen in figuur 2, dat het ultrasoon boren berust op het principe om slijpdeeltjes op het produkt te hameren door de trillingen onderaan de sonotrode, waardoor het materiaal wordt weggeërodeerd.

De sonotrode staat echter door de trillingen niet op het voorwerp doch *boven* het voorwerp en het boren vindt dus plaats door het slijpmiddel. Een veelvoorkomende vraag uit de praktijk is, welke materialen er geboord kunnen worden. Welnu, dit zijn alleen harde en brosse materialen. We hebben namelijk gezien dat de sonotrode boven het te boren oppervlak staat en de deeltjes op het oppervlak hamert.

Bij een zacht materiaal reflecteert de slijpkorrel niet, zodat de sonotrode op het produkt komt te staan in plaats van er boven. Doordat men met het slijpmiddel boort en niet met de sonotrode zelf, kan men met een sonotrode uit vrij *zacht* materiaal, *harde* materialen bewerken. De snelheid en mate van boren wordt dan ook bepaald door het *slijpmiddel* en niet door het *materiaal* van de sonotrode.

De slijtage die aan de sonotrode plaatsvindt komt dan ook door het voortdurend langslopen van het slijpmiddel. Dit is dan ook de reden dat men meestal de sonotrodes aan de uiteinden uitwisselbaar maakt zodat niet steeds de hele sonotrode vervangen moet worden. Het uiteinde van de sonotrode kan uit een ander materiaal gemaakt worden. Bijvoorbeeld roestvrijstaal, half gehard staal of messing. Het slijpmiddel dat gebruikt wordt is over het algemeen Bohrcarbid, aluminiumoxyde en soms diamantpoeder.

De nauwkeurigheid van het ultrasoon boren hangt af van de korrelgrootte van het gebruikte slijpmedium. Om een extreme nauwkeurigheid te bereiken is het soms noodzakelijk meerdere opeenvolgende bewerkingen te doen, waarbij steeds fijnere slijpmiddelen worden gebruikt. De laatste sonotrode heeft dan de juiste afmetingen. De verkregen toleranties kunnen zeer klein zijn. Bij het gebruik van fijne slijpmiddelen ligt deze tussen de 2 en 10 micron.



Over het algemeen kan men stellen dat de tolerantie gelijk is aan 2 tot $3 \times$ de diameter van de korrel van het slijpmiddel. Het slijpmiddel dat het meest gebruikt wordt is Bohrcarbid waarvan de diameter van de korrel gekozen kan worden aan de hand van het resultaat dat men wil bereiken.

In figuur 9 ziet u een tabel waar de meshmaten en korrelgrootte wordt weergegeven. Resumerend heeft het Bohrcarbid 4 belangrijke eigenschappen:

- de grote hardheid, het is namelijk een slijpmiddel dat het hardst is op diamant na.
- het is licht.
- het is chemisch resistent.
- het heeft een hoog smeltpunt.

Bohrcarbid (B12 C3)	
Mesm	Korrel
120	150-100
180	100- 60
220	90- 60
250	70- 40
280	50- 20
320	45- 10
400	40- 5
600	20- 5

De finish van het verkregen oppervlak

De finish van het geboorde oppervlak is afhankelijk van de uitgeoefende druk op de electro-acoustische omvormer, de korrelgrootte en de amplitude. Als de druk op de acoustische omvormer toeneemt zal de afstand tussen sonotrode en het te boren produkt kleiner worden waardoor de finish fijner wordt. Het aantal grote korrels van het slijpmiddel die onder de sonotrode komen wordt namelijk hierdoor kleiner.

Dit wordt nog eens bewezen door het feit dat bij het gebruik van grote korrels, wanneer men een blind gat boort, de oppervlakte gesteldheid van de wanden ruwer is dan die van de bodem. Deze laatste is namelijk afhankelijk van de afstand sonotrode-bodem en de amplitude van de vibratie. Hieruit volgt dus dat de oppervlakte gesteldheid van bodem en zijwanden niet altijd gelijk hoeft te zijn.

Vorm van de geboorde gaten

Als men enkele produkten geboord heeft dan zal men tot de conclusie komen dat de wanden konisch zijn en de bodem bol. Dit laatste heeft als oorzaak dat de korrels van het slijpmedium minder goed onder het midden van de sonotrode kunnen komen. Bij grote precisie is het dus noodzakelijk om voor te boren met een gereedschap op de juiste maat en een fijne korrel.

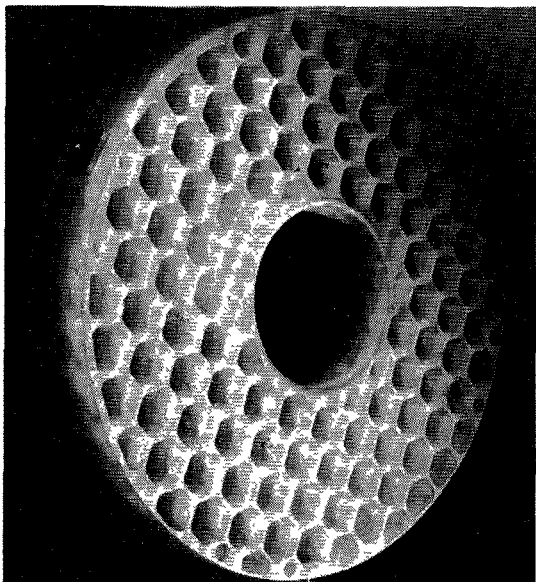
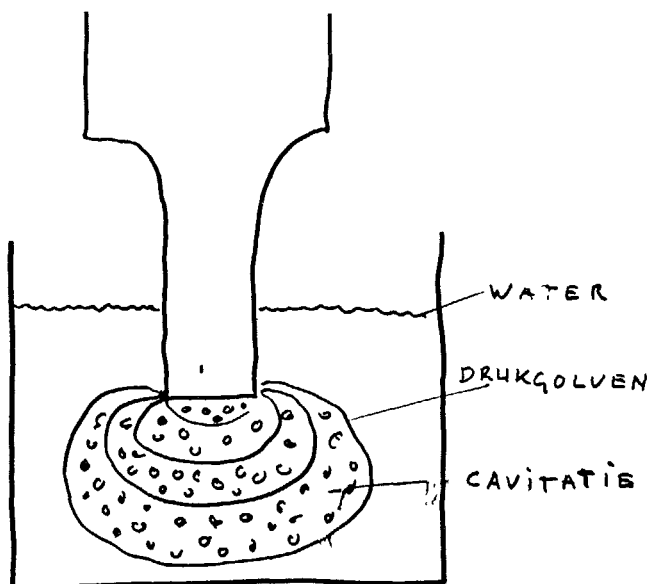


Foto 3. Een lichtgewicht spiegel; gemaakt met behulp van ultrasoon boortechnieken. (Foto: Division Optique des Engins Matra)

Het verschijnsel cavitatie bij het ultrasoon boren

Cavitatie ontstaat in een vloeistof op een punt waar druk en trek golven optreden. Tijdens de trekfase tussen twee drukgolven in ontstaat een luchtledige ruimte die bij een volgende drukgolf implodeert. Dit imploderen noemen wij cavitatie. De krachten die vrij komen zijn vrij groot en veroorzaken aan het oppervlak van een materiaal dus in ons geval aan de onderkant van de sonotrode erosie.



MINIMAAL 1 à 2 W/cm²

Om een cavitatie in een vloeistof op te wekken is een minimaal vermogen nodig. Bij 20 kHz in water is dit ongeveer minimaal 1 à 2 watt per cm² afgegeven energie aan de onderkant van de sonotrode. Bij ultrasoon boren is de energiedichtheid onderaan de sonotrode zeer hoog. Deze kan wel oplopen tot 200 watt/cm². Bij het ultrasoon boren met een slijpmiddel is op de erosie van de sonotrode na, het cavitatie effect echter te verwaarlozen. Het heeft enkel als voordeel dat door implosies een circulatie van het

slijpmiddel ontstaat, hetgeen de homogeniteit van het boren te goede komt. Een nadeel is, dat de implosies veroorzaakt door de cavitatie geluid met zich meebrengt. Geluidsmetingen bij een boormachine van ca. 200 Watt hebben waarden opgeleverd van ca. 105 dba. De enige oplossing hiervoor is een geluidsisolerende kast om de boormachine te bouwen of om oorbeschermers te dragen.

Snelheid van het boren

De snelheid van de bewerking is niet afhankelijk van de te maken vorm maar van de hoeveelheid te verwijderen materiaal.

Om deze reden is het aan te bevelen waar mogelijk holle sonotrodes te gebruiken, die sneller penetreren en waarbij slechts een klein oppervlak bewerkt wordt.

Diverse factoren beïnvloeden de snelheid van de bewerking:

- trillingsamplitude,
- frequentie,
- uitgeoefende druk van de sonotrode op het werkstuk.
- vorm en oppervlak van de sonotrode.
- boordiepte,
- gesteldheid van het te bewerken materiaal.
- hardheid, korrelgrootte en concentratie van het slijpmiddel.
- soort vloeistof waarin het slijpmiddel in suspensie is.

In de praktijk is gebleken dat het rendement groot is als de amplitude overeenkomt met de korrelgrootte van het slijpmiddel.

De snelheid van het boren is ook afhankelijk van de concentratie van het slijpmiddel in de vloeistof.

De concentratie mag niet te hoog zijn daar anders het slijpmiddel slecht rondgepompt kan worden en de suspensie bij een dergelijke concentratie zeer snel indroogt.

In de praktijk ligt de concentratie tussen 25 en 35%.

De gekozen vloeistof moet goed bevochtigen, goed warmte kunnen afvoeren, en niet corrosief zijn noch voor het onderdeel noch voor de sonotrode.

Om deze reden wordt meestal gewoon water gekozen. Het slijpmiddel zal door breuk en slijtage na verloop van tijd zijn eigenschappen verliezen. Tevens zal in het slijpmiddel het geboorde materiaal worden opgenomen, waardoor de snelheid van boren zal teruglopen. Het spreekt vanzelf dat van tijd tot tijd het slijpmiddel zal moeten worden verwisseld. Dit verwisselen geschiedt in de praktijk meestal als de snelheid van boren tot de helft is teruggelopen.

Het aanmaken van sonotrodes

Eén van de belangrijkste facetten van het ultrasoon boren in de praktijk is het aanmaken van sonotrodes. Het is gebleken dat het vooral voor mechanische onderlegde mensen het moeilijk is te begrijpen dat een stuk metaal een eigen frequentie kan hebben, dat niets met electriciteit te maken heeft. Lengte van een sonotrode is namelijk afhankelijk van de doorloopsnelheid van een bepaalde frequentie in het materiaal. We hebben daarstraks gezien dat de sonotrode een lengte heeft van een halve golflengte van 20 kHz.

Als men nu de doorloopsnelheid van 20 kHz in titanium of duraluminium bekijkt dan zal men een lengte van nominaal 124 mm vinden. We kunnen echter niet alle sonotrodes op 124 mm maken, daar de frequentie dus ook de lengte afhankelijk is van de vorm van de sonotrode, de diameter van de sonotrode en het soort materiaal.

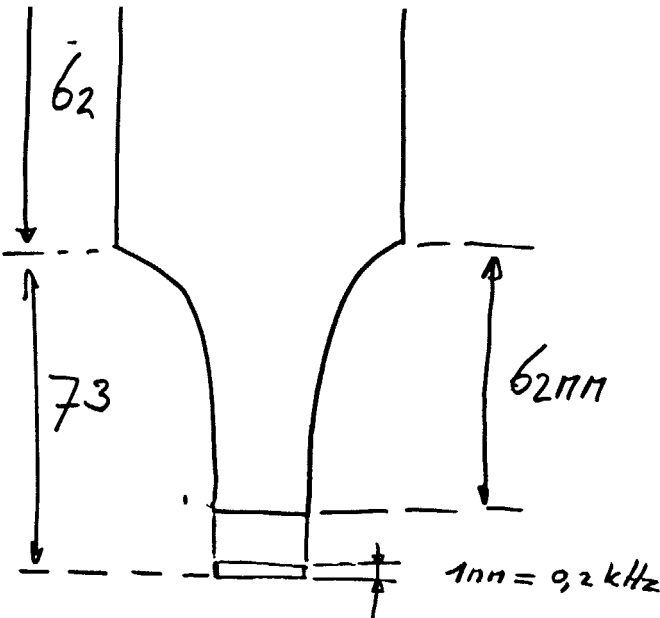
U kunt zich voorstellen dat ook het basis materiaal titanium weliswaar onder dezelfde specificatie gefabriceerd wordt doch niet altijd exact dezelfde dichtheid hoeft te hebben. Dit is dan ook de reden dat men elke sonotrode die men opnieuw aanmaakt op de juiste frequentie zal moeten afregelen.

De meest eenvoudige methode is om een frequentiemeetapparaat op de generator zelf te hebben dat wil zeggen dat is een ingebouwde laagfrequent generator met een frequentiemeter en een galvanometer om het juiste frequentiepunt te bepalen. Hiermede wordt een frequentie met een zeer lage spanning op de elec-

troacoustische omvormer gezet en aan de knop van de laagfrequentgenerator gedraaid totdat een dip op de galvanometer wordt verkregen. Deze dip wordt verkregen als de frequentie van laagfrequent generator exact overeenstemt met de resonantie frequentie van de electro-acoustische omvormer. Bij deze resonantie-frequentie is namelijk de impedantie van de electroacoustische omvormer het laagst.

Een groot risico is altijd bij het maken van een sonotrode dat de sonotrode te kort is. Een sonotrode die eenmaal te kort is, is alleen nog maar geschikt voor de prullebak.

Ga bij het ontwerp van een sonotrode uit van een ruw voorbewerkt model met een lengte van ca 135 mm. Dit geldt dan bij een frequentie van 20 kHz. De sonotrode kan men dus exponentieel ofwel bicylindrisch maken. Maakt men de sonotrode bicylindrisch dan zal men het bovenste gedeelte maken op 62 mm en het onderste wordt dan 73 mm.



Schroef daarna de sonotrode aan de mechanische versterker van de omvormer en doe een meting. Daar de sonotrode bewust te lang is gekozen zal de frequentie dus lager zijn dan 20 kHz.

Laten wij nu aannemen dat wij een frequentie meten van 18 kHz. Demonteer dan de sonotrode en haal van het onderste gedeelte 1 mm af. Monteer dan de sonotrode weer en meet opnieuw de frequentie waarbij men bv als tweede frequentie 18,2 kHz vindt. Hieruit volgt dat 1 mm overeenkomt met 0,2 kHz. Om dus een frequentie van 20 kHz te bereiken moet men een verschil van 1,8 kHz overbruggen hetgeen overeenkomt met 9 mm.

In werkelijkheid is de frequentievariatie echter niet lineair met de lengte van het secundaire gedeelte. Haal daarom eerst 4 mm of 5 mm van de lengte af en meet dan opnieuw, zodat een beter beeld verkregen wordt omtrent de verhouding lengte-frequentie.

Zoals reeds eerder is vermeld, is het zeer praktisch om met sonotrodes te werken met verwisselbare uiteindes die aangepast kunnen worden aan het te boren gat.

Hierbij moet niet uit het oog worden verloren dat het onderste gedeelte van de sonotrode korter gemaakt zal moeten worden waarbij dan de sonotrode met uiteinde samen, een frequentie van 20 kHz moeten hebben.

Als het uiteinde vastligt doordat dit aangepast is aan de te boren vorm zal dus de sonotrode korter moeten worden gemaakt aan het onderste gedeelte en tijdens het meten het uiteinde er telkens worden opgeschroefd.

De reden dat het zeer belangrijk is om de sonotrode op de nominale frequentie van 20.000 Herz plus of min 500 Herz te krijgen is dat het piëzo-elektrisch trilelement het mechanische versterker afgestemd is op 20 kHz. Het piëzo-elektrisch trilelement heeft een rendement dat in de buurt ligt van 90% echter alleen bij de resonantiefrequentie.

Dat wil zeggen als de sonotrode niet juist is afgestemd bijvoorbeeld op een frequentie van 18 kHz of 22 kHz dan zal de resonantiepiek van de acoustische omvormer dus van het piëzo-elektrische trilelement met mechanische versterker liggen op 20 kHz, terwijl de resonantiepiek van de sonotrode op 18 of 22 kHz zal liggen. Hieruit volgt dat de generator niet meer perfect af te stemmen is en zal op een gemiddelde van deze 2 waarders werken waardoor het rendement achteruit zal gaan.

Daar het piëzo-elektrisch trilelement mechanische versterker een groter gedeelte van de totale acoustische omvormer is als de sonotrode zal de afstemfrequentie dichter in de buurt liggen van het piezo-elektrisch trilelement met mechanische versterker dus 20 kHz dan van de frequentie van de sonotrode. Dit heeft dan tot gevolg dat er vanuit de sonotrode reflecties komen die de piezo-elektrische schijven kunnen doen scheuren. Er is daarom slechts een tolerantie van ± 500 Herz toegestaan voor de sonotrode.

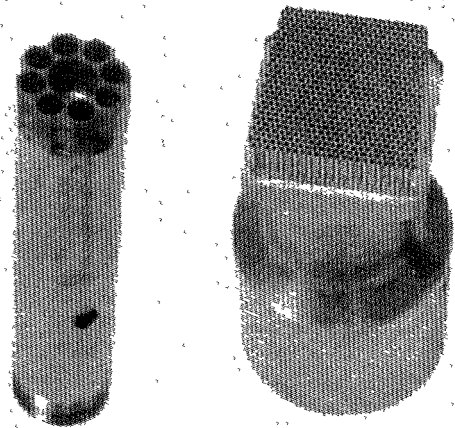


Foto 4. Voorbeeld van meervoudige boren voor de serie fabricage van silicium of germanium pastilles voor transistoren.

Na de omschrijving van het ultrasoon boren en de apparatuur die daar voor nodig is geef ik u in willekeurige volgorde enkele meest belangrijke toepassingen:

- uitboren van pastilles, voor halfgeleiders met een speciale vorm.
- seriefabricage van silicium of germanium pastilles voor transistoren waarbij één sonotrode tot ca. 300 pastilles in 30 seconden kan uitsnijden.
- boren en afsnijden van keramische lagen bestemd voor meervoudig gedrukte schakelingen.
- boren van ferrieten.
- naslijpen van trekstenen uit diamant of wolfram.
- het boren of vormgeven van sieraden.
- het boren of graveren van glas.

Tenslotte volgt de conclusie die ik voor mezelf getrokken heb: Het ultrasoon boren wordt vooral de laatste 10 jaar meer en meer toegepast hoewel de techniek reeds dateert uit het jaar 1927.

Het ultrasoon boren concurreert als methode vaak met het diamant-gereedschap.

De snelheid van ultrasoon boren is echter vele malen lager dan die van diamantboren.

Het heeft echter als voordeel dat in elke willekeurige vorm geboord kan worden.

Het ligt dan ook in de verwachting dat men in de toekomst beide technieken gaat combineren. Het grote voordeel is dan de snelheid van bewerken. Een probleem is echter de vating van de diamantkorrels in de sonotrode. De ultrasonische trillingen met wat grotere vermogens maken namelijk deze diamantkorrels los. Als dit probleem wordt opgelost, zal het toepassingsgebied aanzienlijk worden uitgebreid en het ultrasoon boren meer bekendheid gaan genieten.