

Een nederlands specialisme?

Machines voor ultra-precisie bewerking

Ir. M. Breuning.

Ultra-precision is defined in terms of dimensional tolerances, accuracy of form and surface roughness. These requirements can only be met by the use of dedicated machines, such as the lathes built by the Dutch specialist machine manufacturer "Hembrug B.V."

The many factors that have an influence on the cutting process are briefly discussed. The special engineering solutions, to eliminate intolerable effects and necessary to achieve the required precision results, are described. Finally examples of machines as built by the Dutch manufacturer are illustrated and their specification briefly mentioned.

Ultra-precisie, wat is dat?

Er is sprake van ultra-precisie als aan de produkten respectievelijk werkstukken eisen worden gesteld zoals

- een zeer geringe oppervlakteruwheid, respectievelijk een hoge licht-reflectiefactor,
- een zeer hoge maat- en/of vormnauwkeurigheid.

Dikwijls gaat dit ook nog gepaard met een complexe geometrie.

Wat betreft de oppervlakteruwheid gaat het om het bereiken van tenminste een R_a van ca. 0,01 à 0,05 μm

Bij de maatnauwkeurigheid gaat het om toleranties in de orde van grootte van enkele 0,001 mm of minder; dit is tenminste een factor 10 kleiner dan bij conventionele machinebouw precisie. Bij de vormnauwkeurigheid gaat het om afwijkingen van rechtheid of cilindriciteit van ca. 0,0005 mm, of om soortgelijke geringe afwijkingen bij meer complexe profielen.

Ultra-precisie produkten

De produkten, waaraan ultra-precisie eisen gesteld worden, lopen zeer uiteen. Vlakke, holle, bolle en parabolische spiegels in metaal uitgevoerd zijn evidente voorbeelden. Ook prisma's en polygonen zijn bekende voorbeelden, evenals geheugenschijven voor computer-randapparatuur

Andere voorbeelden zijn aerostatische en hydrostatische lagers, trommels c.q. walsen voor kopieerapparaten en, in grotere

afmetingen, walsen voor foliebedekkingsmachines (voor tape-fabricage bijvoorbeeld).

Lenzen, waaronder fresnelenzen e.d., en matrijzen voor kunststoflenzen moeten eveneens genoemd worden, evenals verbindingstukken voor glasvezeloptiek.

Werkstukken, zoals de trommel voor de aftastkop van videorecorders, zijn onderdelen die in zeer grote aantallen met ultra-precisie worden geproduceerd.

Nog vele andere voorbeelden zijn te noemen, zoals onderdelen voor afdichting in gaskranen, compressoronderdelen voor koelkastaggregaten, enz.

Ook de vlakbewerking van dunne siliciumschijven voor de halfgeleiderindustrie (transistoren, geïntegreerde schakelingen) wordt door ultra-precisie bewerking aanzienlijk gerationaliseerd waarbij een veel beter resultaat met betrekking tot het vermijden van beschadiging van het oppervlak wordt verkregen dan met conventionele slijp- en polijstbewerkingen

Vele van de genoemde produkten zijn voorbeelden uit de fijnmechanische techniek die dikwijls nauw verbonden is met de elektronische industrie. Andere voorbeelden zijn typische produkten van de optische industrie, de ruimtevaart-instrumentatie en de research-laboratoria

Materialen voor ultra-precisie produkten

Voor ultra-precisie bewerking lenen zich non-ferro materialen zeer goed. In het bijzonder aluminium; maar ook messing, brons, beryllium en koper.

Daarnaast laten zich ook PMMA, polymethylmetacrylaat (plexiglas, perspex), en zelfs glas goed bewerken. Evenals diverse geharde staalsoorten.

Ultra-precisie bewerking

Bij het bewerken van produkten, waaraan de genoemde extreme eisen worden gesteld, worden zowel aan de machine als aan het slijproces bijzondere eisen gesteld. Voor het bewerken van non-ferro materialen wordt meestal gebruik gemaakt van monokristal diamantbeitels vanwege de hoge slijtvastheid, waardoor de zeer scherpe snijkant relatief langdurig bruikbaar blijft. Daarbij wordt bij een hoge slijtsnelheid slechts een kleine tot zeer kleine spaan afgenomen, typisch is een spaandoorsnede van 1×10^{-5} à 10^{-4} mm^2 . De daarbij behorende snijkrachten zijn dan ook slechts een fractie (10^{-5} à 10^{-4} maal)

van die op normale bewerkingsmachines, een typische waarde is ca. 0,1 N.

Het ultra-precisie bewerken van ferro-materialen is aanzienlijk moeilijker, maar zeer wel mogelijk. Daarbij wordt meestal niet dezelfde zeer geringe oppervlakteruwheid gehaald als bij non-ferro materialen. Wel kan meestal slijpen of polijsten achterwege blijven. Voor ferro-materialen is diamant als betelmateriaal niet geschikt (koolstof lost op in ijzer!); men gebruikt CBN (kubisch boriumnitride), andere keramische snijmaterialen of Wo-carbide hardmetaal. Voor wat betreft de spaanafname en snijkrachten geldt ongeveer hetzelfde als bij non-ferro; de snijnelheden worden lager gekozen in verband met de warmte-ontwikkeling.

Factoren die de nauwkeurigheid en oppervlaktekwaliteit beïnvloeden

Diverse factoren beïnvloeden de maat- en vormnauwkeurigheid en de oppervlaktekwaliteit. Zij kunnen worden verdeeld in drie groepen, te weten.

- invloeden vanuit de omgeving,
- factoren die gerelateerd zijn aan de bewerkingsmethode,
- invloeden die hun oorsprong vinden in het gedrag van de machine

Een invloed vanuit de omgeving is ten eerste de omgevingstemperatuur. Temperatuurvariaties die de temperatuur van de machine doen variëren en/of in de machine temperatuur-gradiënten veroorzaken, beïnvloeden zowel het werkstuk als de geometrie van de machine en het snijgedrag.

Op de tweede plaats kunnen trillingen in de omgeving trillingen in de machine of delen daarvan veroorzaken, die eveneens de geometrie beïnvloeden.

Factoren die met de bewerkingsmethode samenhangen zijn de volgende.

- De beetelvorm
Voor het bereiken van een zeer geringe oppervlakteruwheid is een zo groot mogelijke neusradius van de beitel noodzakelijk. Die dient bovendien zeer nauwkeurig constant te zijn in verband met het afwikkelen bij het snijden van contouren.
- De beitelslijtage
Dit spreekt wel haast voor zichzelf. Ook een diamantbeitel is onderhevig aan slijtage en dient van tijd tot tijd te worden geslepen.

Machines voor ultra-precisie bewerking

- De werkstukincklemming respectievelijk opspanning. Spankrachten kunnen het werkstuk vervormen, daarom is licht spannen gewenst en vooral een goede verdeling van de spankracht belangrijk.
- De stijfheid van het werkstuk zelf. Dunwandige constructies zijn uiteraard trillingsgevoelig, een robuuste constructie is in het algemeen aan te bevelen.
- Het werkstukgewicht. Een in verhouding zwaar werkstuk kan door belasting van de machine vervormingen veroorzaken. Zware werkstukken kunnen ook meer onbalans veroorzaken.
- De verspaningscondities. Snijnsnelheid, aanzet en snedediepte zijn vanzelfsprekend van invloed; vandaar dat bij ultra-precisie bewerken met hoge snelheid en zeer kleine aanzet en snedediepte gewerkt wordt.

Bij de geringe verspaningskrachten speelt warmte-ontwikkeling geen grote rol, zodat de thermische eigenschappen van het werkstukmateriaal niet van veel belang zijn. De warmte gaat grotendeels in de spaan zitten. Meestal wordt er ook een smeer- tevens koelmiddel toegepast, gewoonlijk lichte petroleum of alcohol. Een goede spaanafvoer door afzuigen is noodzakelijk om beschadiging van het oppervlak te voorkomen.

De eigenschappen en het gedrag van de machine zijn zeer sterk bepalend voor het bereiken van ultra-precisie resultaten. Voor een hoge geometrische nauwkeurigheid zijn de statische en dynamische stijfheid van belang.

Hoge statische stijfheid betekent een zeer geringe vervorming door de belasting met het werkstukgewicht en/of door de bewegende sleden en de snijkraft.

Hoge dynamische stijfheid betekent dat de amplitude van eventuele trillingen zeer

gering blijft. Dit heeft met name voor de constructie van lagers en aandrijving van de hoofdspil respectievelijk voor de lagering en aandrijving van de sleden belangrijke consequenties. De hoofdspil dient zeer zuiver (hoge rondloopnauwkeurigheid) te lopen. Ook de rondloop-eigenschappen van de spil van de losse kop spelen een grote rol.

De geometrische positioneer- en repetitienauwkeurigheid van de sleden dient aan hoge eisen te voldoen. Dit betekent afwezigheid van stick-slip en een hoge resolutie van het meetsysteem.

Tenslotte dient de dynamische bandbreedte van de servo-aandrijvingen en van de CNC-besturing zodanig hoog te zijn dat geen volgfouten ontstaan respectievelijk na-ijlen optreedt.

Consequenties voor de constructie van de machine

De ultra-precisie eisen en het minimaliseren van de diverse invloedsfactoren hebben vergaande consequenties voor de constructie van de machine en de hulpagegaten.

Om temperatuursinvloeden uit de omgeving te beperken dient de machine in een geklimatiseerde ruimte geplaatst te worden, waarin de temperatuur zo goed mogelijk constant gehouden kan worden. Tevens dient de ruimte stofarm te worden gehouden. De fundatie waarop de machine is geplaatst dient stabiel te zijn en geïsoleerd van de bedrijfsvloer en de fundatie van het gebouw.

Voor de statische stijfheid van de machine is de keuze van grote, althans royaal bemeten lagerdiameters met groot draagoppervlak van belang, zodat een stijve hoofdspil wordt verkregen. Voor de eventuele losse kop geldt hetzelfde. Kogel- of rollagers lopen niet nauwkeurig

genoeg; daarom wordt een hydrostatische lagering toegepast. Dit heeft het voordeel van zeer lage en constante wrijving, een hoge constante en toerentalonafhankelijke lagerstijfheid en eenvoudige temperatuurbeheersing door koeling of op constante temperatuur houden van de olie. In sommige gevallen, bij zeer lichte belasting door werkstukgewicht en snijkraften, voldoet een aerostatische lagering ook. Het heeft het voordeel van extreem lage wrijving, is echter aanzienlijk minder stijf.

Verder is een zeer goede ondersteuning van hydrostatische rechthoekige sledegeleidingen van groot belang.

Tenslotte is een robuuste en zeer stabiele machinevoet noodzakelijk. Hiervoor zijn zowel zware gietstukken in nodular gietijzer (Meehanite) toegepast als massief kunststof-graniet. De beste resultaten worden verkregen met natuurgraniet. Dit materiaal heeft een hoge E-modulus, een relatief laag soortelijk gewicht, vertoont geen krimp en "werkt" niet en er kunnen zeer hoge geometrische nauwkeurigheden (b.v. vlakheid) mee worden bereikt. Het heeft een lage lineaire uitzettingscoëfficiënt en is ongevoelig voor minerale oliën, emulsies of andere chemicaliën, zie tabel 1.

De toepassing van natuurgraniet leidt tot een modulair machineconcept.

Verdere voordelen zijn:

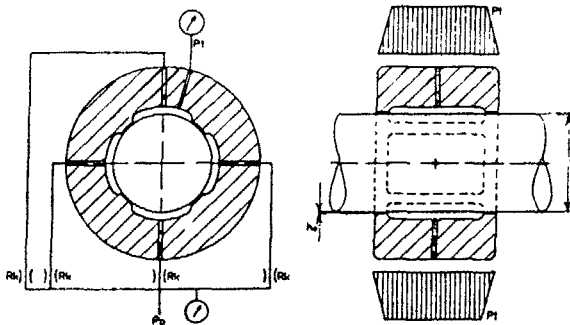
- er zijn geen model en gietvorm nodig,
- corrosiebescherming door verven is overbodig,
- het is gemakkelijk schoon te houden.

Tenslotte geeft graniet ook een precisie-imago, hetgeen de algehele zorgvuldigheid bij het bewerken stimuleert.

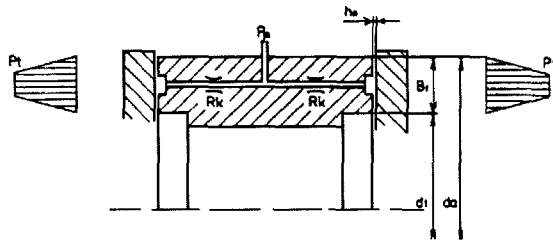
Voor een hoge dynamische stijfheid is de reeds genoemde hydrostatische lagering van de hoofdspil van groot belang. Ook

	Elasticiteitsmodulus N/mm ²	Dichtheid (s.g.) kg/m ³	Lineaire uitzettingscoëfficiënt K ⁻¹ · 10 ⁻⁶	Warmtegeleidingscoëfficiënt Wm ⁻¹ K ⁻¹	Treksterkte N/mm ²	Druksterkte N/mm ²
Gietijzer type 17	117.000	7 210	12	75	230	
Epoxygraniet	39 000	2.450	14	0,8	20	120
Polymere beton (Motema)	42.000	2.300	17		11	120
Natuurgraniet (Garbo/Impala)	125.000	2 900	5	3	14	250

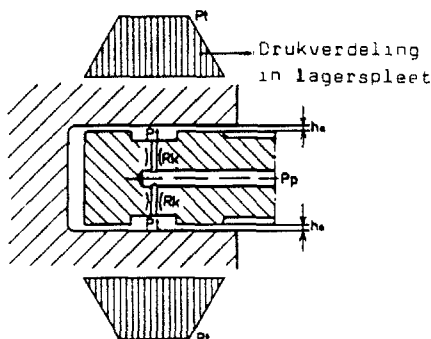
Tabel 1: Eigenschappen van materialen voor machinevoetconstructie.



Figuur 1 Radiaal hydrostatisch lager: axiale drukverdeling aangegeven met P_1 .



Figuur 2 Axiaal hydrostatisch lager: radiale drukverdeling aangegeven met P_1 .



Figuur 3 Dubbelzijdige hydrostatische leibaanlaging: drukverdeling dwars op de bewegingsrichting aangegeven met P_1 .

een hydrostatische lagering van de sleden is daarvoor noodzakelijk. Figuren 1, 2 en 3 brengen het principe nog eens onder de aandacht. Het vermijden van trillingen, veroorzaakt door het snijproces zelf, is ook zeer belangrijk. Daarvoor is een robuuste en stijve betelschacht noodzakelijk, alsmede een stabiele inklemming.

Alle roterende delen van de machine dienen zeer goed dynamisch gebalanceerd te zijn. Bij directe aandrijving van de hoofdspil stelt dit zeer hoge eisen aan de motor, met name aan de gelijkmatigheid van het draaimoment. Bij een separate opstelling van de motor is een torsiestijve overbrenging van groot belang. Indien aandrijfsnaren worden toegepast, zijn de spanning, de demping van het materiaal en de constante doorsnede van belang. Tandriemen komen niet in aanmerking, zomin als tandwieloverbrengingen.

Tenslotte is het noodzakelijk de machinevoet met trillingsdempers te isoleren van de fundatie om iedere overdracht van buitenaf uit te sluiten. Een zeer lage eigen frequentie is daarbij gewenst, hetgeen mede door een massief granieten machinevoet en juiste keuze van de demperkarakteristiek is te bereiken.

In het hydraulisch systeem dienen pulsaties en trillingen eveneens te worden vermeden. Een schroefpomp voldoet beter dan een schotten- of plunjerpomp. Men past voorts accumulatoren toe en bij voorkeur hydraulische slangen in plaats van pijpleidingen.

De primaire gestabiliseerde oliedruk wordt met behulp van een capillair (weerstand) gereduceerd tot de werkdruk voor de lagers, terwijl restricties in de lagers zorgdragen voor de juiste drukopbouw in samenwerking met de uitstroomweerstand van de lagers.

Om een goede thermische stijfheid van de machine te bereiken, dus vervorming ten gevolge van dissipatie door snijproces, lagerweerstand en eventueel motoren tegen te gaan, is het hydraulisch circuit voorzien van een koeler voor beheersing van de olietemperatuur binnen nauwe grenzen ($0,2^\circ\text{C}$). Aldus kan een grote mate van temperatuurstabiliteit worden bereikt.

Hulpaggregaten zoals hydraulische drukpomp en toebehoren, krachtversterkers en regelsysteem voor de motor, evenals de CNC besturing, worden separaat opgesteld.

De aandrijving van de sleden wordt meestal gerealiseerd met een zeer nauwkeurige kogelomloopspil. Deze wordt aangedreven door een servosysteem. Daarin worden twee terugkoppelsignalen verwerkt, namelijk de snelheid en de positie. Het snelheidssignaal wordt ontleend aan een tacho op de as van de servomotor en het positie signaal komt van een direct meetstelsel dat aan de slede is aangebracht.

Hiervoor wordt gewoonlijk een lineaal toegepast die bestaat uit een op glas aangebrachte zeer fijne en nauwkeurige verdeling, die optisch wordt uitgelezen. De resolutie ligt, al naar gelang de uitvoering, bij $0,1 \mu\text{m}$ tot $0,01 \mu\text{m}$.

Om wrijvingsweerstand en stick-slip te vermijden is een hydrostatische geleiding van de slede noodzakelijk, zoals in verband met de dynamische stijfheid reeds eerder is vermeld. De servomotor dient zeer snel te kunnen accelereren en/of af te remmen, goed op snelheid gehouden te kunnen worden en uiteraard voldoende vermogen te kunnen leveren.

De reactiesnelheid van het getransistoriseerde servosysteem wordt bepaald door de zogenaamde bandbreedte, het frequentiebereik waarbinnen het uitgangssignaal zonder faseverschuiving het ingangssignaal kan volgen. Deze bandbreedte moet in het kHz-gebied liggen. De kringloop waarin ingangssignaal en uitgangssignaal worden vergeleken, wordt vele malen per seconde doorlopen. De repetiteernauwkeurigheid van het positionersysteem van de sleden dient vanzelfsprekend eveneens aan zeer hoge eisen te voldoen.

Zoals al eerder opgemerkt is de rechtheid van de sledebeweging van zeer groot belang om fouten in de positie van de beitelpunt te voorkomen. Immers die bevindt zich op enige afstand van de geleiding, iedere fout in de rechtheid wordt

Machines voor ultra-precisie bewerking

vergroot doorgegeven aan de beitelpunt (Abbe-effect, genoemd naar Ernst Abbe van Zeiss-Jena).

De CNC-besturing moet bij een zo hoge resolutie als boven genoemd, die tenminste tien maal fijner is dan bij gebruikelijke CNC-machines, een tien maal grotere verwerkingssnelheid van de signalen hebben. Aan de CNC-besturing worden dan ook bijzondere eisen gesteld. Daarvoor zijn krachtige en vaak verscheidene microprocessors nodig.

Voorbeelden van ultra-precisie draaimachines

De hieronder vermelde gegevens zijn ontleend aan de documentatie van de fabrikant.

Mini-Mikroturn, zie figuren 4, 5 en 6

Dit is één van de eerste ultra-precisie machines die in serie is geproduceerd. Het is een machine voor het draaien en precisie-nadraaien van aluminium geheugenschijven voor computer-randapparatuur. Meer in het algemeen is de machine geschikt voor het vlakken van substraten met zeer hoge vlakheidseis en een zeer hoge oppervlaktekwaliteit.

Bij een schijfdiameter van 130 mm wordt een oppervlakteruwheid gehaald van $0,008 \mu\text{m R}_a$. De aerostatisch gelagerde hoofdspil is met een DC motor geïntegreerd. De spilsnelheid is continue variabel van 0 tot 6000 omw/min.

De axiale en radiale rondloopnauwkeurigheid van de hoofdspil bedraagt niet meer dan $0,05 \mu\text{m}$.

Bed en hoofdspilhuis zijn uit één stuk, uitgevoerd in natuurgraniet, en ondersteund door luchtbalgdempers.

De dwarslede is uitgerust met hydrostatische rechthoekige leibanen.

Het werkstuk wordt met vacuüm opgespannen.

De houder voor de diamantbeitel is in microns verstelbaar.

De bewerkingscyclus wordt met behulp van een PLC automatisch bestuurd.

De machine is voorzien van digitale maatuitlesing.

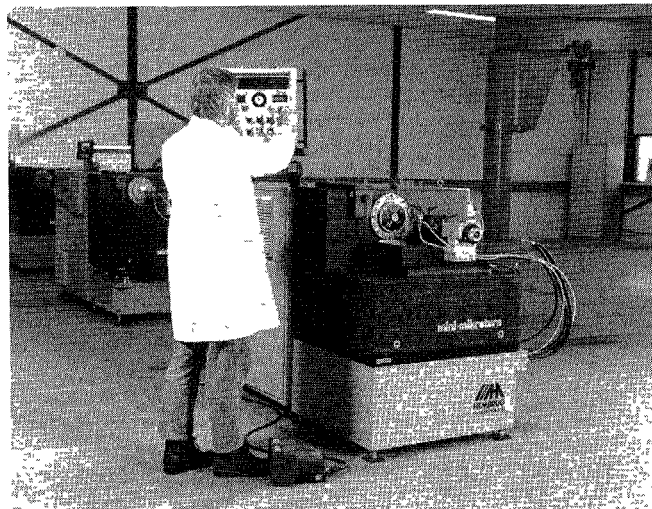
De elektronica en de hydraulische en pneumatische apparatuur is in een aparte, losstaande, behuizing ondergebracht. In spaanafzuiging kan worden voorzien.

Super-Mikroturn CNC, zie figuur 7

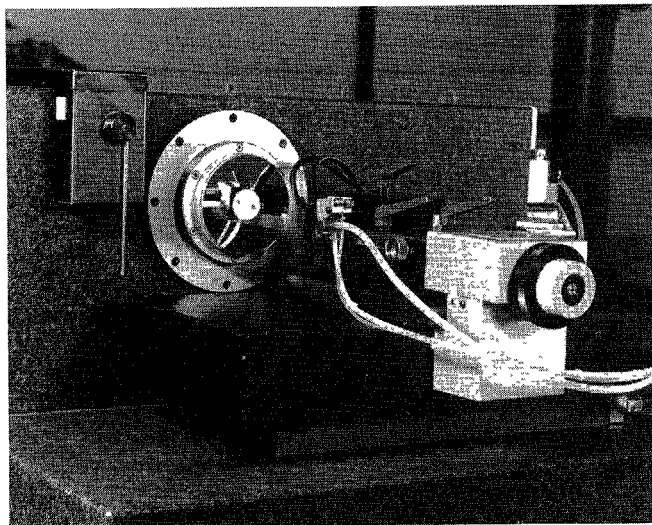
Deze machine is in verschillende uitvoeringen gebouwd en vormt de basis voor een aantal ultra-precisie machines.

Bij de meeste versies is de machinevoet uitgevoerd in natuurgraniet.

Figuur 4 Mini-Mikroturn vlakdraaimachine.

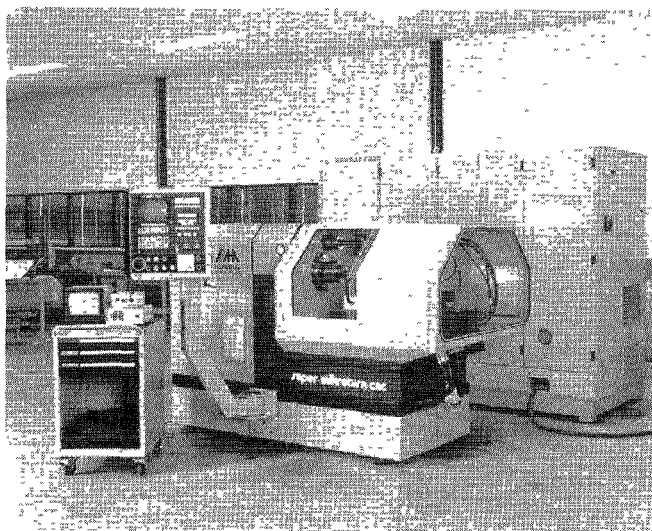


Figuur 5 Mini-Mikroturn close-up met opgespannen hard-disk computerschijf.



Figuur 6 Een serie Mini-Mikroturn machines in de assemblage-afdeling bij Hembrug, Haarlem.





Figuur 7 Eén van de uitvoeringen van de Super-Mikroturn CNC.

Hoofdspil en sleden zijn hydrostatisch gelagerd

De aandrijving geschiedt direct op de hoofdspil met een DC motor.

De basismachine is niet voorzien van losse kop

De machine is uitgerust met CNC-besturing. De resolutie van de meetsystemen van de sleden bedraagt al naar gelang de uitvoering $0,1 \mu\text{m}$ tot $0,01 \mu\text{m}$.

De hulpaggregaten en besturing zijn in een separaat opgestelde kast ondergebracht. Een grote variatie van spanmiddelen, zowel standaard als werkstuk-specifiek, kan door de fabrikant worden geleverd.



Figuur 8 Mikroturn CNC voor het precisiebewerken van walsrollen.

De belangrijkste gegevens van de afgebeelde machine zijn de volgende:

- maximum werkstukdiameter: 400 mm,
- maximum werkstuklengte: 200 mm,
- hoofdspilnelheid continue variabel met maxima van 3000, 5000 of 7000 omw/min, afhankelijk van de hoofdspilconstructie en van het geïnstalleerde motorvermogen,
- voedingssnelheid continue variabel tot een maximum van 5000 mm/min,
- maximale axiale en radiale rondloopnauwkeurigheid van de hoofdspil minder dan $0,0001 \text{ mm}$,
- rechtheid van de sledebaan beter dan $0,001 \text{ mm}$ over 150 mm,
- haaksheid van de dwarslede t.o.v. de hoofdspil hartlijn beter dan $0,002 \text{ mm}$ over 100 mm.

De stijfheid van de hoofdspillagers bedraagt

- frontlager van 100 mm diameter: axiaal $1140 \text{ N}/\mu\text{m}$ en radiaal $1020 \text{ N}/\mu\text{m}$
- achterlager van 80 mm diameter: radiaal $640 \text{ N}/\mu\text{m}$.

De stijfheid van de geleidingen van langs- en dwarslede bedraagt: $720 \text{ N}/\mu\text{m}$.

Figuur 9 Mikroturn CNC voor het precisiebewerken van walsen en trommels voor kopieermachines e.d.

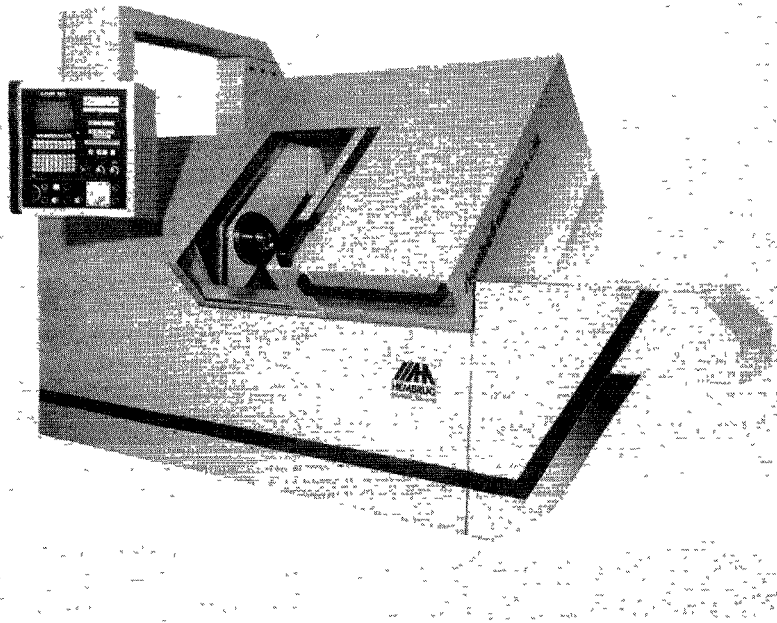


Mikroturn Specials

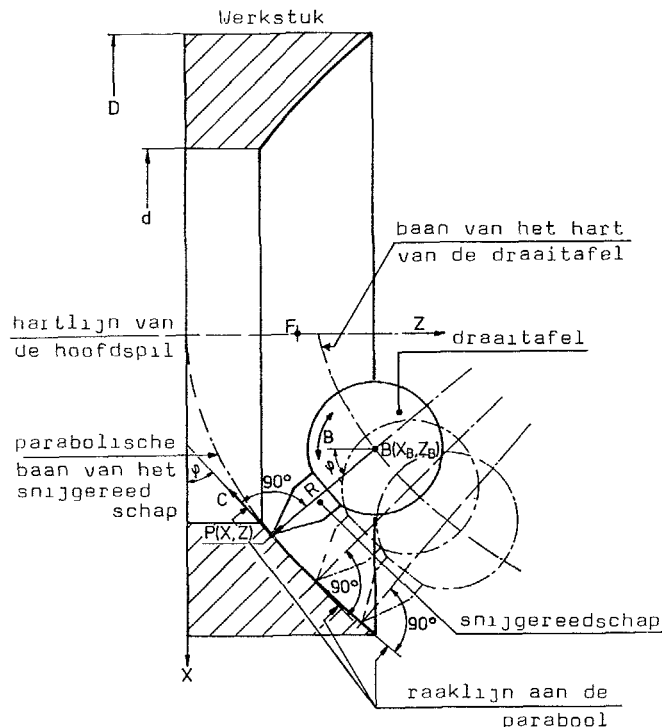
De speciale machine, afgebeeld in figuur 8, is ontwikkeld voor het zeer nauwkeurig rond en cilindrisch bewerken van trommels en walsen voor kalenders en foliemachines. Bijvoorbeeld walsen voor machines voor de productie van magnetische band voor audiocassettes of videotoe-passingen. Voor deze producten evenals magnetische slappe schijven (floppy-disks, diskette schijven) wordt van brede folie uitgegaan, waarop de magnetische laag wordt aangebracht. Ook walsen voor drukpersen en allerlei zeer nauwkeurige cilindrische onderdelen in zowel staal, non-ferro als polyurethaan kunnen op deze machine worden bewerkt.

Zowel de hoofdspil als de meedraaiende spil van de losse kop zijn hydrostatisch

Machines voor ultra-precisie bewerking



Figuur 10 "Slantbed" Mikrotorn CNC, ultra-precisie hydrostatische produktiedraaimachine.



**Figuur 11
Principe van de
roterende
beitelhouder
voor het draaien
van een parabo-
lisch oppervlak.**

gelagerd. De machinevoet (bed) is van natuurgraniet. Het werkstuk wordt via een hydraulische precisiespanbus geklemd en aangedreven en kan op de machine dynamisch worden gebalanceerd.

Verdere gegevens:

- maximum produktdiameter: 330 mm,

- maximum lengte tussen hoofdspil en losse kop: 1540 mm,
- hoofdspilnelheid continue variabel tussen 1 en 1500 omw/min,
- aandrijfvermogen: 15 kW.

Bij de genoemde produktafmetingen zijn een rechteheid respectievelijk cilindriciteit binnen $3 \mu\text{m}$, een rondheid binnen $2 \mu\text{m}$ en

een oppervlakteruwheid van minder dan $0,05 \mu\text{m} R_a$ realiseerbaar.

Een andere, wat kleinere, speciale machine uitgerust met numerieke besturing, is afgebeeld in figuur 9

Deze machine is bestemd voor het voor- en ultra-precies nadraaien van aluminium walsen voor kopieermachines en laserscanners en aluminium of kunststof rollen en dergelijke onderdelen voor andere kantoormachines.

Ook voor walsen voor rotatiepersen en precisiecilinders is de machine geschikt. Wederom is de machinevoet uitgevoerd in natuurgraniet en zijn hoofdspil en losse kop hydrostatisch gelagerd.

Verdere gegevens.

- maximum werkstukdiameter 120 mm,
- maximum lengte tussen hoofdspil en spil van de losse kop: 500 mm,
- hoofdspilnelheid variabel tussen 500 en 5000 omw/min,
- aandrijfvermogen: 30 kW,
- maximale axiale en radiale rondloopnauwkeurigheid van de hoofdspil en spil van de losse kop is kleiner dan $0,1 \mu\text{m}$.

"Slant-bed" Mikrotorn CNC

Deze machine, zie figuur 10, is een meer universeel toepasbare ultra-precisie produktiemachine.

De machine is geschikt voor velerlei onderdelen waaraan ultra-precisie eisen met betrekking tot oppervlaktekwaliteit en maat- en vormnauwkeurigheid worden gesteld, gepaard aan complexe vormen. Zoals parabolische spiegels, polygoonspiegels, brandstofinjectie spuitmonden, fresnellenzen, enz.

Ook voor de bewerking van gehard stalen onderdelen leent de machine zich.

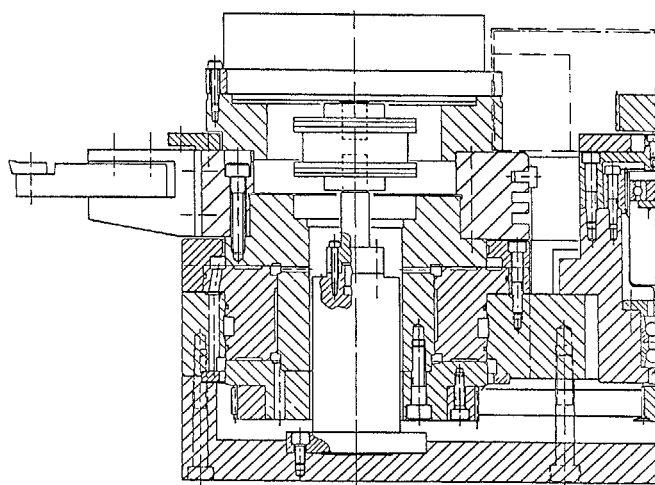
Zowel hoofdspil als langs- en dwarslede zijn hydrostatisch gelagerd. De machinevoet (het bed) is wederom van natuurgraniet. Het meetsysteem kan met een resolutie van $0,1$, $0,05$ of $0,01 \mu\text{m}$ worden geleverd

Verdere gegevens:

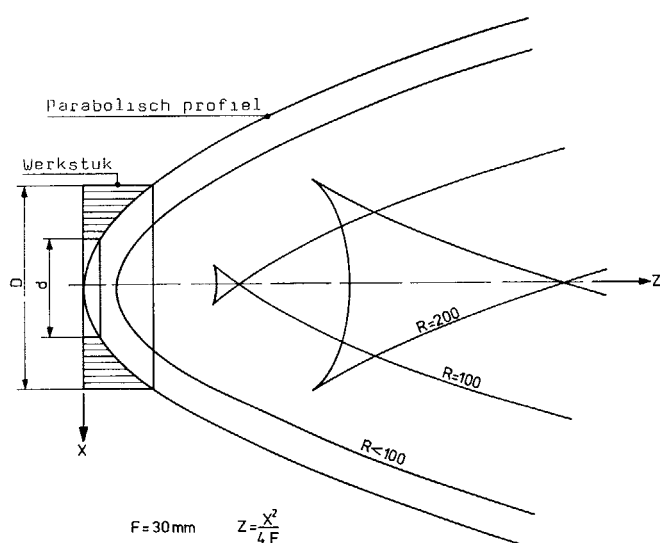
- maximum produktdiameter: 400 mm,
- maximum produktlengte: 250 mm,
- hoofdspilnelheid variabel van 1 tot 3000 omw/min,
- aandrijfvermogen: 8 kW,
- axiale en radiale rondloopnauwkeurigheid van de hoofdspil minder dan $0,1 \mu\text{m}$

Roterende beitelhouder

Om een zo groot mogelijk profiel nauwkeurigheid van een parabolische spiegel te bereiken is het wenselijk de hartlijn van de symmetrische diamantbeitel tijdens het



Figuur 12
Doorsnede van
de hydrostatisch
gelagerde
roterende
beitelhouder.



Figuur 13 De
baan van het
hart van de
roterende
beitelhouder
voor verschillen-
de waarden van
de radius.

volgen van de profielbaan voortdurend loodrecht op de momentane raaklijn van het profiel te houden, zie figuur 11. Immers, dan wordt het afwikkelen van de neusradius voorkomen. Dit geldt trouwens ook voor ieder ander profiel

Om dit te realiseren is een bijzondere, draaibare en aangedreven, beitelhouder ontwikkeld in samenwerking met de Universiteit van Bremen, Afdeling Productie Technologie.

Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een tamelijk gecompliceerd computerprogramma.

De beitelhouder is daartoe gemonteerd op een hydrostatisch gelagerde draaitafel en wordt numeriek bestuurd, zie figuur 12. De draaitafel is uitgerust met een geïntegreerd meetsysteem met een resolutie van 0,36"

De gecompliceerde baan van het hart van de draaitafel, die afhankelijk is van de radius, dat is de afstand van beitelpunt tot dat hart, wordt met het computerprogramma gegenereerd afhankelijk van de parameters van het paraboolprofiel. De radius kan variëren van 150 tot 200 mm, zie figuur 13.

Het programma levert tegelijkertijd de stuursignalen voor de langs- en dwarsledeaanrijving. De minimum rotatiesnelheid van de draaitafel bedraagt 0,004 omwentelingen per minuut. Het systeem bereikt een positionauwkeurigheid van 2" over 180° met een herhalings-nauwkeurigheid van 0,7" ($\pm 2 \text{ Sigma}$)

Figuur 14 toont de inrichting, gemonteerd op de dwarslede van de machine

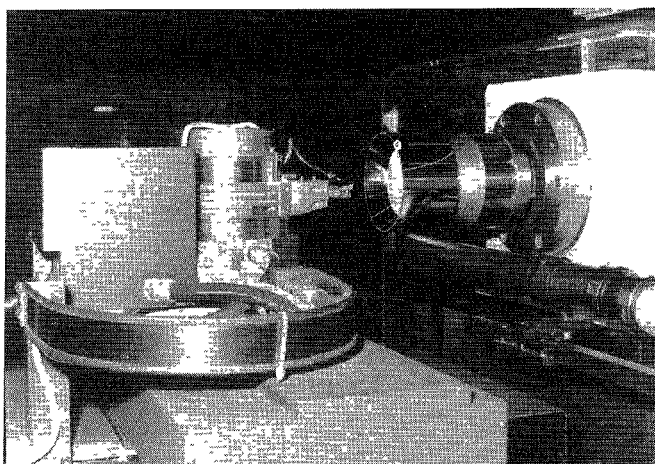
Tot besluit

Ofschoon de enige nederlandse fabrikant van ultra-precisie bewerkingsmachines op dit specialistisch gebied niet de enige leverancier ter wereld is, heeft zij zich wel een vooraanstaande positie verworven. Die berust op een, in bijna twee decennia opgebouwde, unieke kennis en ervaring. Met enig recht kan dan ook van een nederlandse specialisme worden gesproken.

Literatuur

- [1] Een aantal constructieve aspecten van hoognauwkeurige diamantdraaimachines, P H Knol en Ir D Szepesi, Hembrug B V , Mikroniek 26(1986)2
- [2] Präzisions - Drehmaschinen höchster Genauigkeitsklasse; P H Knol und D Szepesi, Hembrug B V ; Feinwerk & Messtechnik 95(1987)1
- [3] Airbearings machined on ultra-precision hydrostatic CNC lathe, P H Knol, D Szepesi, Hembrug B V and Jan M Deurwaarder, Machinefabrieken Nederlandse Philips Be-

Figuur 14 De
roterende
beitelhouder
gemonteerd op
de dwarslede.



Machines voor ultra-precisie bewerking

drijven, SPIE Vol 803 Micromachining of Elements with Optical & other submicrometer Dimensional & Surface Specifications, 1987
 [4] Diamantdrehen von Präzisionsbauteilen, P H Knol, D Szepesi, Industrie Diamanten Rundschau IDR 22(1988)2
 [5] New design features of a fully hydrostatic ultraprecision CNC turning machine, type Super Mikroturn CNC, P H Knol, D Szepesi, M Huijbers, Hembrug B V , Proceedings of the International Congress for Ultraprecision Technology, UPT, in Aachen, Mai 1988, Edited by Manfred Weck and Robert Hastel, Forschungsgemeinschaft Ultrapräzisionstechnik e.V., Springer Verlag.
 [6] Manufacturing and Measuring of Aspherics, Integrated in one Ultraprecision Machine, P H Knol, D Szepesi, Hembrug B V

and P Guenther Werner, Wilhelm Knappert, University of Bremen Dept of Production Technology, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, volume 1015, september 1988
 [7] Single-point Diamond Turning, promotieproefschrift door Tjoe Chong George Lo-A-Foe, 1989, Technische Universiteit Eindhoven. ■

Hembrug, de nederlandse fabrikant van bewerkingsmachines voor zeer hoge precisie, is voortgekomen uit een reeds zeer lang bestaand bedrijf. Hembrug heeft ook een lange traditie op het gebied van gereedschapswerktuigen. Het oorspronkelijke staatsbedrijf werd in 1679 opgericht onder de naam "Artillerie Inrichtingen". Omstreeks 1900 werd het gevestigd in de gemeente Zaandam, vlak bij de "Hembrug", de toen nog draaibare spoorbrug over het Noordzeekanaal.

In 1973 werd het bedrijf gesplitst in twee delen, te weten:
 – Eurometaal, met als doelstelling het ontwikkelen en fabriceren van munitie voor geschut en (hand-) wapens, en
 – Hembrug, dat zich bezighoudt met het ontwikkelen, fabriceren en verkopen van gereedschapswerktuigen resp. bewerkingsmachines.

In 1982 werd Hembrug geprivatiseerd. Het bedrijf verhuisde in 1983 van Zaandam naar Haarlem, de naam "Hembrug" bleef behouden.

Reeds voor de splitsing van AI had het bedrijf zich toegelegd op de ontwikkeling en fabricage van draaibanken, boormachines en speciaal machines, evenals werkplaatsgereedschappen zoals de bankklem.

Sinds de vorming van Hembrug als gereedschapswerktuigen-industrie zijn wereldwijd meer dan 20.000 metaalbewerkingsmachines verkocht

Begin van de jaren zeventig werd reeds door Hembrug een ultra-precisie draaibank ontwikkeld voor geheugenschijven (hard-disks) voor computer-randapparatuur. Dit leidde tot de ontwikkeling van een hydrostatisch gelagerde hoofdspil en de eerste Mikroturn machines die nog met mechanische sledes waren uitgerust. Naast deze ultra-precisie machines

bleven normale precisiemachines enige tijd de bread-and-butter-line.

In het begin van de jaren tachtig leidde een bedrijfsanalyse tot het omstreeks 1984 genomen besluit zich geheel te concentreren op ultra-precisie machines voor het micron- en submicron gebied en op speciaal machines.

Anno 1991 is Hembrug op dit gebied specialist, één van de wereldwijd verspreide fabrikanten die een zèèr klein select gezelschap vormen. Het marktgebied hiervoor is uiteraard veel kleiner dan voor standaard CNC-machines. Hembrug heeft verschillende toonaangevende Europese fabrikanten van precisie-producten en -instrumenten als klant.

Het bedrijf zelf heeft een betrekkelijk klein personeelsbestand van ca. 50 man in Haarlem, waarvan meer dan de helft zich met ontwikkeling en ontwerp bezighoudt. De onderdelen en componenten worden betrokken van streng geselecteerde toeleveranciers; de precisie-nabewerkingen, de zeer scrupuleuze controle's en stringente tests alsmede de assemblage geschieden in de eigen moderne fabriek.

Hembrug B. V. behoort tot de Hembrug-groep waarin voorts zijn opgenomen:

- Figeo haveninstallaties voor goederenoverslag (Haarlem);
- NKM Nederlandse Kraan Maatschappij, o.a. manipulatoren voor aluminium smelterijen (Haarlem),
- NBM: Nieuwe Boomse Metaalwerken, o.a. zware staalconstructies (Boom bij Antwerpen);
- Praxis: Ingenieursbureau, ontwikkeling van industriële installaties (IJmuiden);
- NSI: Nederlandse Service Industrie, inspecties ten behoeve van door Figeo, NKM en NBM geleverde installaties.