

Navorsings- en oorsigartikels

Die optimisering van die snyproses van diamante met behulp van 'n YAG-laser

A.J. Lubbe

Departement Bedryfs- en Sisteemingenieurswese, Universiteit van Pretoria, Pretoria 0002

Ontvang 25 Junie 1993; aanvaar 25 Oktober 1993

UITTREKSEL

Diamante wat met 'n laser gesny word, kan nie normaalweg, soos deur die leek aanvaar word, met een snit dwarsdeur gesny word nie. Honderde snitte mag selfs nodig wees om deur 'n diamant te "kerf". Daar is verskeie parameters soos bv. snyspoed, fokuspunt, oorvleueling van snitte, ens. wat by die snyproses 'n rol speel. Om die snyproses te optimaliseer, is lasersnitte in diamante op 'n sistematiese wyse met behulp van 'n elektronmikroskoop ondersoek. Die metode, tegniek en resultate van die navorsing word in hierdie artikel bespreek.

ABSTRACT

The optimization of the cutting process of diamonds with a YAG laser

A laser cannot, as generally assumed by the layman, cut right through a diamond with a single cut. A couple of hundred cuts may be necessary to "chip carve" through a diamond. There are several parameters, for example cutting speed, focus point, overlapping of cuts, etc., that influence the cutting process. With a view to optimizing the cutting process, laser cuts in diamonds were studied in a systematic way with the aid of an electron microscope. The method, technique and the results of the research are discussed in this article.

1. AGTERGROND

Tradisioneel word diamante gevorm deur dit te kloof of te saag en dan met behulp van diamantpoeier te slyp.

Die *kloofproses* bestaan daaruit dat 'n diamant in twee dele verdeel kan word deur 'n spleet op die oppervlak van die diamant, in die rigting van die grein, met 'n roterende diamantsnylem te saag en dan die spleet met 'n skerp snylem oop te kap. Die grein van 'n diamant is soos die grein van hout. Vir hout word 'n kloofsaag gebruik om in die rigting van die grein te saag en 'n dwarssaag vir snitte loodreg daarop.

As 'n diamant in enige ander rigting as die grein verdeel moet word, word dit m.b.v. 'n saaglem dwarsdeur gesaag. Slegs reguit snitte is met so 'n *saagproses* moontlik. As voorbeeld kan genoem word dat dit tot ongeveer 10 uur in beslag kan neem om 'n hartvorm met 'n oppervlakte van 1 cm² en 1 mm dikte uit 'n diamant te saag. Met die moderne tegniek waar diamante met 'n YAG-laser gesny word, kan dié hartvorm in ongeveer 10 minute verkry word.³

Alhoewel diamante reeds vir etlike jare in bv. Israel en Nederland m.b.v. YAG-lasers gesny word, is daar weens industriële geheimhouding weinig oor die tegniek gepubliseer. Databasissoektogte van meer as 10 000 artikels wêreldwyd het slegs sewe relevante artikels opgelewer.

In Suid-Afrika is die tegniek tot dusver op 'n probeeren-tref-metode toegepas. Verskeie aspekte van die tegniek is nou gestandaardiseer as uitvloeisel van die navorsing, soos in hierdie artikel bespreek word.

2. AANLEIDENDE PROBLEME

- 2.1 Die optimum snyspoed vir die sny van diamante met behulp van 'n YAG-laser is onbekend.
- 2.2 Snitdiepte per snit is onbekend.
- 2.3 Optimum oorvleueling van snitte is onbekend.
- 2.4 Interaktiewe beheer oor oorvleueling van snitte is nog nie ontwikkel nie.
- 2.5 'n Program vir die beheereenheid wat outomatiese fokusverstellings van die YAG-laser gedurende die snyproses beheer, is nog nie ontwikkel nie.⁴

Die oplossing van bogenoemde probleme is as doelwit vir die navorsing gestel.

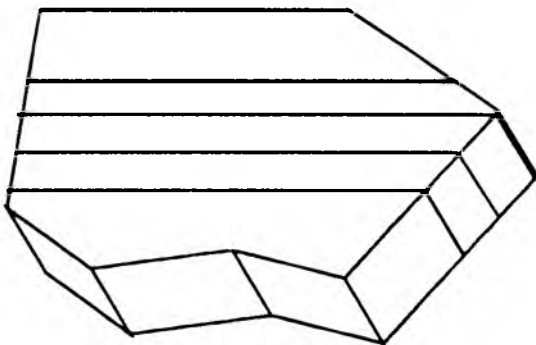
3. NAVORSINGSMETODE

- 3.1 Rowwe, ongeslypte diamante met plat oppervlaktes is van die verskaffers verkry en met 'n vergrootglas ondersoek om die rigting van die grein te bepaal.
- 3.2 Programme is vir die BOSCH-beheer van die numeriesebeheerde snytafel geskryf om verskillende snitte mee te reguleer.
- 3.3 Deur slegs een van die parameters wat ondersoek word op 'n keer te varieer en al die ander konstant te hou, is verskeie snitte loodreg op die grein van 'n diamant gemaak. Geen dekgas of snygas is tydens die snyproses gebruik nie.
- 3.4 Die eksperimentele diamant is deur 90° gerooteer, omgedraai en 'n keep is saam met die grein

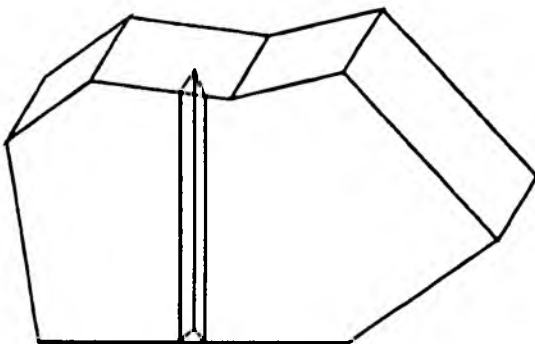
op die middellyn van die diamant en op die agterkant daarvan gesny (kyk figuur 1). Die diamant is op hierdie keep gekloof om 'n sy-aansig van die lasersnitte bloot te lê.

- 3.5 Die een helfte van die diamant wat so verkry is, is vervolgens voorberei vir ondersoek onder 'n elektronmikroskoop.
 - 3.5.1 Die diamante is in 'n houder onder vakuüm geplaas;
 - 3.5.2 daarna tot 'n gewenste temperatuur verhit; en
 - 3.5.3 met 'n dun lagie goud beslaan. (Die goudlagie is nodig omdat die elektronmikroskoop elektriese geleidende materiaal nodig het om 'n elektronbeeld te vorm.)
- 3.6 Die goudbeslaande diamante is onder die elektronmikroskoop tot tussen 10 000 en 20 000 maal vergroot.
- 3.7 'n Foto is van elke snit op die diamant geneem.
- 3.8 Na ontwikkeling van die foto's is die effek van elke verandering direk op die foto's gemeet.
- 3.9 Die hele proses is vir elke parameter wat ondersoek moes word, herhaal.

Parallele snitte op die oppervlak en loodreg op die diamantgrein



Groef aan onderkant in die rigting van die grein



FIGUUR 1: Parallele snitte op die oppervlak van 'n diamant met 'n kloofkeep agterop.

4. OPTIMUM SNYSPOED

Die optimum snyspoed van diamante met behulp van 'n YAG-laser is in praktyk bepaal deur die spoed tydens 'n snit te varieer en na die klankpeil te luister. Daar is aanvaar dat die optimum snyspoed met 'n spesifieke klankpeil saamval.

Om die optimum snyspoed wetenskaplik te bepaal, is die diepte van ses enkelsnitte aanvanklik, elk met 'n ander snyspoed, op die oppervlak van die vergrote foto's gemeet.

Die kriterium (K) wat vir optimum snyspoedbepaling gebruik is, is

$$K = v \cdot d \text{ (mm}^2\text{/sek.} \times 10^{-3}\text{)} \quad (1)$$

waar v = snyspoed (mm/sek.) en
 d = snitdiepte (μm)

K is eweredig aan die volume materiaal wat per sekonde verwyder word.

Die resulte van die eksperiment verskyn in tabel 1.

TABEL 1
Die invloed van snyspoed op die snitdiepte

Snyspoed (mm/min.)	Diepte (μm)	K ($\text{mm}^2\text{/sek.} \times 10^{-3}$)
450	175	1312
500	163	1358
550	156	1429
600	150	1500
650	135	1462
700	118	1377

Soos in tabel 1 gesien kan word, bestaan daar 'n optimum snyspoed van ongeveer 600 mm/min. waar K 'n maksimum van 1500 bereik. Dit stem naastebly ooreen met die optimum snyspoed wat deur die geluidmetode verkry is.

Diamante is deurlaatbaar vir lig met 'n golflengte van $1,06 \mu\text{m}$, wat die karakteristieke golflengte van YAG-laserlig is.¹ Die laser sny die diamant deurdat 'n geringe hoeveelheid koolstof op die oppervlak van die diamant gevorm word wat dan die laserlig absorbeer en sodoende die energie vir die snyproses vrystel.

Die laser wat vir die eksperimente gebruik is, lewer 5 watt teen 4,6 kHz. Elke puls duur ongeveer 90 nanosekondes lank. Die piekdrywing P kan soos volg bereken word:

$$P = \frac{(5 \div 4600) \text{ watt sek.}}{90 \times 10^{-9} \text{ (sek.)}} \quad (2)$$

$$= 12,08 \text{ kW}$$

Die intense energie op die oppervlak van die diamant veroorsaak verswaring ten spyte van die hoë deurlaatbaarheid van die laserlig.

Wanneer met 'n snyspoed van laer as 450 mm/min. gesny word, kraak sommige diamante (kyk figuur 2). Die rede hiervoor blyk te wees dat die laserlig wat aanvanklik deur die oppervlak deurgelaat word, onsuiverhede kan tref en die energie word gevolglik binne die diamant vrygestel. Dit kan voorkom word deur die snitlyn vooraf te verswart.



FIGUUR 2: 'n Diamant wat gekraak het weens onsuiverhede onder die oppervlak.

Die eksperiment is met verskeie ander diamante herhaal, maar die snitlyne is eers vooraf verswart deur met die laserstraal, terwyl dit uit fokus is, op die snitlyne te beweeg. Dit veroorsaak dat die diamant nie gesny word nie, maar genoegsame koolstof word gevorm om die straal onmiddellik te absorbeer.

Die gemiddelde snitdieptes word in tabel 2 getoon.

TABEL 2
Die invloed van die snyspoed op die snitdiepte wanneer verswarting van die diamant reeds plaasgevind het

Snyspoed (mm/min.)	Gemiddelde snitdiepte (μm)	K $\text{mm}^2/\text{sek.} \times 10^{-3}$
450	202	1515
500	188	1566
550	180	1650
600	173	1730
650	166	1798
680	160	1813
700	154	1796
750	139	1737

Tabel 2 dui 'n optimum snyspoed van 680 mm/mm. aan, wat 'n verbetering van 20,9% in kriterium en dus ook in produktiwiteit meebring.

Die laser sny slegs ongeveer 160 μm per snit diep, en om deur 'n diamant te sny, moet herhaaldelik op dieselfde snit gesny word. Na die eerste snit is die snitlyn reeds verswart en kan daar dus teen die verhoogde snyspoed gesny word.

5. OPTIMUM OORVLEUELING VAN SNITTE

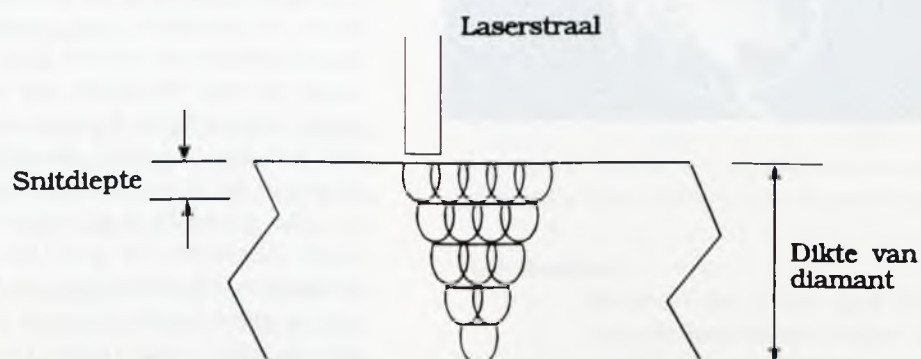
5.1 Algemeen

Die lens van die laser wat gebruik is, het 'n lensspoed van F/19. Die fokusdiameter^{2,5} van so 'n lens word gegee deur

$$S = 1.22 \lambda F/\# \quad (3)$$

waar S = fokusdiameter (μm)
 λ = golflengte van straal (1.06 μm)
 $F/\#$ = lensspoed (19)

Uit bostaande word bereken dat die fokusdiameter van die straal 25 μm is.



FIGUUR 3: Voorstelling van 'n wigvormige snit deur 'n diamant wat verkry is deur oorvleuelde snitte.

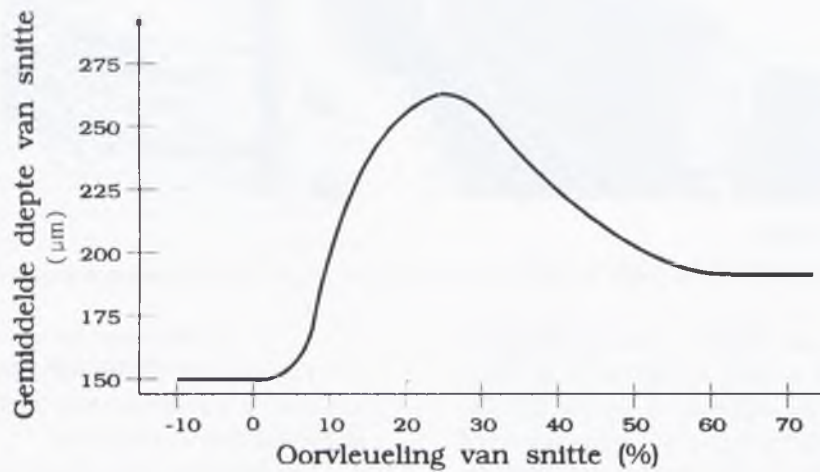
Die gemiddelde gemete snitwydte op die oppervlak van diamante is egter 30 μm en die snitwydte vernou na die bodem van die snit toe. Dit is onmoontlik om 'n gleuf van 30 μm wyd dwarsdeur 'n diamant te sny deur herhaaldelik op dieselfde snitlyn te sny omdat amorf koolstof vanaf die kante van die snit afloop en die bodem opvul.

Een wyse waarop daar dwarsdeur 'n diamant gesny kan word, is deur 'n wyer groef te sny deur 'n reeks parallelle snitte langs mekaar te neem en hierdie reeks dan bo-op mekaar te herhaal totdat die volle diepte bereik is. Figuur 3 toon 'n sy-aansig van sulke snitte wat

horisontaal oorvleuel en waar die getal parallelle snitte langs mekaar vir elke diepteherhaling verminder word met een snit om 'n wigvormige gleuf te verkry.

Om die optimum oorvleueling van snitte te bepaal, is parallelle snitte met geen tot 83% oorvleueling op die oppervlak van 'n diamant gesny. Die diepte vir elke persentasie oorvleueling van snitte is gemeet om te bepaal of daar 'n optimum bestaan, wat wel die geval was. Hierdie eksperiment is vir kontroledoeleindes met verskeie ander diamante herhaal.

Die resultate van die metings word in figuur 4 aangetoon.



FIGUUR 4: Die invloed van oorvleueling van snitte op snitdiepte.



FIGUUR 5: Oorspoel van amorf koolstof van een snit na 'n volgende.

5.2 Verklaring van resultate

Met negatiewe oorvleueling het materiaal tussen die snitte oorgebly en die diepte van elke snit is ongeveer 160

μm . Met 0% oorvleueling is die bodem plat gesny en die parallelle snitte het geen invloed op mekaar uitgeoefen nie, terwyl die diepte van die totale snit dieselfde is as 'n enkelsnit.

Sodra die snitte oorvleuel, is die area waarop die lig gefokus word kleiner en word daar derhalwe dieper gesny. Die gemiddelde snitdiepte vergroot tot ongeveer 26% oorvleueling, waarna dit stelselmatig verklein. Dit rede hiervoor is dat amorf koolstof vanaf die een snit oorfloei na die naasliggende snit en die snit weer gedeeltelik opvul. Die ligter gedeelte aan die onderkant van die snit in figuur 5 is amorf koolstof wat weens die oorvleueling van snitte opgehoop het.

In die praktyk is dit noodsaaklik dat die snitwydte so klein as moontlik moet wees sodat so min moontlik diamantmateriaal verlore gaan. Vir 'n wigvormige snit, waar vir elke dieptesnit een horisontale snit verminder word, soos in figuur 3 getoon, is die wydte van die snit aan die bokant ongeveer dieselfde as die dikte van die diamant. So 'n snit is onprakties wyd.

Die snitwydte kan verklein word deur bv. na elke derde dieptesnit die getal horisontale snitte met een te verminder. Eksperimente met hierdie tegniek het getoon dat die grein van die diamant die straal aan die onderkant van die snit in een rigting buig, sodat koolstof teen die onderkant van die wand versamel en dus 'n onegalige snit veroorsaak.



FIGUUR 6: Buiging van die laserstraal aan die onderkant van die snit.

Om hierdie probleem te oorbrug, is 'n interaktiewe program ontwikkel waarmee die operateur op enige stadium die getal horisontale snitte óf van links óf van regs met een, twee of drie snitte kan verminder. Die operateur hou dus die snitte deur 'n vergrootglas dop en wanneer koolstof teen die een wand opdam, word die snitte in daardie rigting verskuif.

6. OUTOMATIESE VERSTELLING VAN FOKUS-DIEPTE

6.1 Die probleem

Die fokus van die laserstraal word ingestel met behulp van 'n ingeboude mikroskoop. Dit is eenvoudig om die laser te fokus voordat die eerste snit gesny word en terwyl die snytafel stasionêr is, maar wanneer die eerste reeks snitte voltooi is, en 'n volgende dieptesnit begin moet word, kan die laser slegs by benadering gefokus word terwyl die tafel beweeg. Die fokus kan ook elke keer heringestel word deur die snyproses te onderbreek en die tafel tot stilstand te bring, maar dit is hoogs tydrowend en onprakties.

Die ideale oplossing is om die fokusverstelling in die beheerprogram van die numeriesbeheerde snytafel te inkorporeer, sodat die fokus outomaties verstel kan word sonder inmenging deur die operateur.⁴

6.2 Onderzoekmetode

Die presiese fokuspunt van die laserstraal is bepaal deur etse van die straal teen die sykant van 'n perspeksblok te meet. Die mikroskoop is ingestel sodat die fokuspunt van die mikroskoop en dié van die laserstraal saamval.

Om die optimum fokusdiepte te bepaal, word die straal vir 'n breukdeel van 'n sekonde (deur rekenaarprogrambeheer) met 'n spesifieke fokusdiepte op die oppervlak van 'n diamant gerig en die diepte van die gaatjie wat gebrand is, word gemeet. Deur die eksperi-

ment verskeie kere te herhaal met die fokuspunt op afstande wat wissel vanaf 20 μm bokant die oppervlak tot 20 μm onder die oppervlak, is bepaal dat die diepste gaatjie verkry word deur die straal ongeveer 10 μm onder die oppervlak te fokus.

'n Reeks snitte is in diamante gemaak deur die fokus 10 μm onder die oppervlak in te stel en daarna, vir dieptesnitte, geen verdere fokusverstellings te maak nie. Snitdieptes is vir elke dieptesnit gemeet. Die eksperiment is herhaal deur vir elke dieptesnit, die fokus met 'n konstante hoeveelheid (240 μm) te laat sak. Laastens is die laser elke keer na 'n dieptesnit afgeskakel en die fokus is met die hand ingestel tot elke keer 10 μm onder die nuwe oppervlak. Die resultate verskyn in tabel 3.

TABEL 3

Gemiddelde snitdieptes verkry met 'n YAG-laser met 'n snyspoed van 680 mm/min., 26% straaloor-
vleueling en verskillende fokusinstellings

Getal dieptesnitte	Snitdiepte sonder fokusverstelling (μm)	Snitdiepte met konstante fokusverstelling (μm)	Snitdiepte met fokusverstelling 10 μm onder die oppervlak (μm)
1	250	250	250
2	353	398	490
3	433	543	661
4	502	652	790
5	560	708	901
6	610	870	980
16	1100	1250	1690
25	1262	1375	2150

6.3 Resultate

1. Wanneer die fokus glad nie verstel word nie, neig die maksimum diepte wat gesny kan word na 'n konstante waarde. Aanvanklik word ongeveer 100 μm , per dieptesnit gesny, maar tussen 16 en 25 dieptesnitte word gemiddeld

slegs 29 µm diep gesny. Dit is dus noodsaaklik dat die fokus wel verstel word.

2. In die geval waar die fokus telkens met 'n konstante hoeveelheid verstel word, is die fokuspunt aanvanklik naby die oppervlak van die materiaal, maar soos die snitte vlakker word, gaan dit al dieper onder die oppervlak in. 'n Geringe verbetering in snitdiepte, ten opsigte van geen fokusverstelling nie, word verkry deur die fokus met 'n konstante hoeveelheid te verstel.
3. Deur die fokus elke keer korrek in te stel tot 10 µm onder die vlak wat gesny moet word, word nie alleenlik die optimum diepte gesny nie, maar dui die diepte van elke dieptesnit, die hoeveelheid aan waarmee die fokus elke keer verstel moet word om die fokus korrek in te stel.

Verskeie wiskundige passings is deur die punte in kolom vier van tabel 3 gedoen. Die volgende vergelyking gee 'n passing van ongeveer 90% akkuraatheid deur die genoemde punte:

$$y = 250 \sqrt{3x - 2} \quad (4)$$

waar y = snitdiepte (µm) en
 x = getal dieptesnitte is en ($x > 0$)

Outomatiese fokusverstelling word met hierdie vergelyking verkry as die nulpunt van die z-as (fokus-as) van die lasermasjien vanaf 10 µm onder die oppervlak van die diamant inkrementeel, vir elke dieptesnit met die y-waarde van vergelyking (4), gedekrementeer word.

Die toepassing van vergelyking (4) is in die praktyk getoets en lewer inderdaad die korrekte fokusverstellings.

7. GEVOLGTREKKINGS

- 7.1 Navorsing van hierdie aard is 'n duur proses omdat sowel die materiaal wat verbruik word as die toerusting wat benodig word, baie duur is. Dit is ook 'n baie tydsame proses omdat bv. een V-groef met 25 dieptesnitte, 325 enkelsnitte met die laser vereis. Verder is die toerusting, laser en elektronmikroskoop onderskeidelik in Johannesburg en Pretoria beskikbaar, wat veroorsaak het dat baie tyd deur reistyd tussen die twee sentra in beslag geneem is. Die besef dat die navorsing nie maklik herhaal kan word nie, het tot gevolg gehad dat elke stap met groot noukeurigheid uitgevoer moes word.
- 7.2 Uit die navorsing, as geheel kan die volgende gevolgtrekkings gemaak word:
 - a) Verskille in kwaliteit van, en die tipe diamant, het geen invloed op die snyproses as dit met 'n YAG-laser uitgevoer word nie. Uit meer as 50 verskillende diamante waarop gemiddeld ses snitte per diamant gesny is, is geen groot afwykings ten opsigte van die snyproses gevind nie. Die rede hiervoor is

waarskynlik dat die diamant op die snit na amorfe koolstof verander word en dat die koolstof wat gevorm word en met elke snit gesny word, onafhanklik is van die tipe diamant.

- b) Die rigting van sny ten opsigte van die grein van die diamant en die posisie van die snit op die diamant, speel geen rol ten opsigte van die snyproses nie.
- 7.3 'n Snyspoed van 680 mm/min. is hoog in terme van die berekeningspoed van die beheereenheid van die laser. Vir kontoere wat met parameter-programmering gedefinieer word, is dit raadzaam om die laser af te skakel, terwyl berekeninge tussen herhalings gedoen word. Indien dit nie gedoen word nie, kan die laser 'n gat brand terwyl dit vir 'n oomblik verwyl totdat die berekeninge voltooi is.
 - 7.4 Die oorvleueling van snitte kan wissel vanaf 20% tot 30% sonder om die diepte van die snit wesentlik te beïnvloed. Die wydte van die groef wat gesny word, kan dus slegs in 'n geringe mate beïnvloed word deur die persentasie oorvleueling van snitte te verander. Die minimum waarde waarmee 'n groef normaalweg vernou kan word, is 74% van 'n enkelsnitwydte. Indien die groef vernou word deur bv. een horisontale snit aan die linkerkant van die groef te verminder, is die groef nie meer simmetries nie en in so 'n geval behoort die middellyn van 'n dieptesnit verskuif te word om saam te val met die middel van die groef. Indien die middellyn nie opmekaar val nie, buig die straal weg vanaf die loodregte kant van die snit in die rigting van die skuinskant.
 - 7.5 Indien die fokus met behulp van die afgeleide verwantskap (vgl. 4) outomaties verstel word, is inmenging gedurende die snyproses deur die operateur onnodig. Een operateur kan dus verskeie masjiene beheer en die nodigheid verval om vir elke laser 'n operateur beskikbaar te hê.
 - 7.6 Die navorsing sou nie moontlik gewees het sonder 'n grondige kennis van Numeriese Beheer sowel as Parameterprogrammering nie.

LITERATUURVERWYSINGS

1. Willis, J.B. & Davis, M.B. (1974). The drilling of diamond dies for the production of fine wire using a laser powered drilling machine, *Wire Industry*, 993-998.
2. Gresser, H.D. (1976). Laser sawing of diamonds, *Society of Manufacturing Engineers*, MR76-855, 1-13.
3. Rogers, J.K. (1986). Laser drilling cutting time and cost in diamond die manufacture, *Wire Industry*, 440-449
4. Belanger, P.A. (1983). Self-focusing of Gaussian beams: an alternate derivation, *Optical Society of America*, 22, No. 9. 1293-1295.
5. Kiang, Y.C. & Lang, R.W. (1983). Measuring focused Gaussian beam spot sizes: a practical method, *Optical Society of America*, 22, No. 9. 1296-1297.