

Bearbetning med Nd:YAG-laser i
nickellegeringen Hastalloy-X

Lars Boström

Examensarbete vid Volvo Flygmotor,
Trollhättan

LRAP-69 (1986)

INNEHÅLL

- 1 Förord
- 2 Inledning
- 3 Hastalloy-X
- 4 Olika lasertyper
 - 4.1 Nd:YAG-lasern
 - 4.2 Nd:Glas-lasern
 - 4.3 CO₂ -lasern
- 5 Utveckling inom lasertekniken
 - 5.1 Användningsområden
 - 5.2 Forskning på materialbearbetning
- 6 Borrning med lasrar
 - 6.1 Percussion drilling
 - 6.2 Skärning
 - 6.3 Trepanning
- 7 Krav på hålkvalitet och ingående parametrar
 - 7.1 Pulsvidden
 - 7.2 Frekvensen
 - 7.3 Skyddsgaser
 - 7.4 Skärhastigheten
- 8 Uppställningen
- 9 Utförande
- 10 Utvärdering
- 11 Appendix
- 12 Referenser

1. Förord

Föreliggande examensarbete utfördes på Volvo Flygmotor under sommaren 1985. Avsikten med examensarbetet var att finna riktvärden för laserbearbetning.

Ett tack till följande personer:

Mina handledare Anders Mellin och Kenneth Andersson m.fl på laboratoriet, laseroperatörerna och bibliotekarien, samtliga på Volvo Flygmotor, och Stig Borgström, LTH.

Lund december 1986

Lars Boström

2. Inledning

I april 1984 inköptes av Volvo Flygmotor en Nd:YAG-laser av fabrikket JK Lasers.

Examensarbetet gällde att utföra borrhningar i Hastalloy-X (se kap 3). Vid tidigare borrhningar hade en del problem uppstått. Sprickor hade bildats och dessutom hade ett lager av återsmält material, s k "recastlayer", bildats. Vid användning av finkornig plåt hade inga problem med sprickor uppstått.

Målet med min undersökning blev då att få sprickfritt i så grovkornig plåt som möjligt och samtidigt minimera tjockleken hos recastlayer.

För att åstadkomma detta gjordes en serie borrhningar med olika parametrar (se kap 7). Ca 350 hål borrades men till följd av dålig genomträngning måste en stor del av dessa kasseras. Som förberedelse till undersökningen gjorde jag en litteraturundersökning på området materialbearbetning med laser. Denna har legat till grund för en allmän framställning om laserbearbetning i metall samt väglett mig vid valet av de olika parametrarna.

3. Hastalloy-X

Denna nickellegering är extremt seg och robust och tål mycket höga temperaturer. Tabell 1 visar dess procentuella sammansättning och en del hållfasthetsdata. Dess egenskaper gör den bl.a lämplig i flygmotordetaljer som utsätts för höga temperaturer. Den är dock väldigt svårarbetad, speciellt med konventionella verktyg, men även med laser.

VOLVO FLYGMOTOR AB

STANDARD

Fastställt år-mån Approved year-month	1978-08	Std.nr Std.No.	9419-0
Utgåveår Issue No.	5	År-mån Year-month	1978-08
		Sidor Page No.	1 (1)

NICKELLEGERING	Flygmaterial 3
Hastelloy X	

1. CHARGEFORDRINGAR

Analys	C	Si	Mn	P	S	Cr	Fe	Mo	Co	W	Ni
Min %	0,05					20,5	17,0	8,0	0,50	0,20	rest
Max %	0,15	1,0	1,0	0,040	0,030	23,0	20,0	10,0	2,50	1,00	

2. PRODUKTFORDRINGAR

ANALYS

Analyskraven enligt ovan skall gälla med de avvikelser som anges i AMS 2269.

HÅLLFASTHETS- OCH ÖVRIGA FORDRINGAR

Beteckning	9419-02		
Leveranstillstånd	Upplösningsbehandlat a)		
Leveransform	Plåt		Stång Smide
Dimension	mm	>0,5 ≤4,7	>4,7
0,2-gräns	N/mm ²	min 310 b)	min 275 b)
Brottgräns	N/mm ²	min 725 b)	min 690 b)
Förlängning A50 mm		min 35 b)	min 35 b)
Hårdhet	HB		max 241
Böckning		c)	c)
Kornstorlek ASTM E112		e)	
Krypbrothållfasthet		d)	d)
Närmaste AMS-motsvarighet		AMS 5536G	AMS 5754G

c) Materialet skall utan att sprickor uppstår kunna böckas α grader över dorn med diametern D. Böckningen skall utföras parallellt med materialets valsningsriktning. Fordringarna gäller böckning vid rumstemperatur.

t nom mm	α grader	D mm
≤ 1,3	180	1,5 x t
> 1,3 ≤ 4,7	180	2 x t

d) Temperatur: 815 ± 3 °C
Belastning: 103 N/mm^2 för stång och smide.

Belastning: 110 N/mm^2 för plåt
Tid till brott: min 24 h

Förlängning efter brott
A50 mm min 8 % för plåt
A40 mm min 10 % för stång, smide

e) Medelvärde 4 eller finare för plåt
≤ 3,2 mm.

a) 1160-1190 °C. Kylning i vatten eller luft.
Hålltid: min 20 min för stång och smide. För plåt avpassas tiden med hänsyn till dimension.

b) Avser tvärsprov för bredder ≥ 230 mm resp längdprov för bredder < 230 mm.

3. VOLVO FLYGMOTORS FÖRRÄDSNUMMER

Beteckning	Förrädsnummer	S-kod
9419-02	4941902	

4. DEFINITIONER OCH BETECKNINGAR

Frangår av standard 189220.

Ändring:

Tabell 1.

4.1. Nd:YAG-lasern

Denna laser togs fram år 1964. Den kan användas både pulsad och kontinuerlig. För att åstadkomma populationsinversion används i det förra fallet xenonlampa och i det senare kryptonlampa.

Nd:YAG är en kristall av yttriumaluminiumgranat $Y_3Al_5O_{12}$ där där ca 1 % av Y^{3+} ersatts med Nd^{3+} . Dess laservåglängd är 1064 nm. Dess verkningsgrad är 3-3.5 % . Den tål höga pulsenergier utan att ta skada.

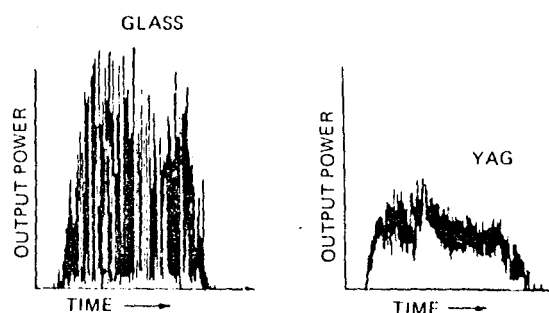
Dessa egenskaper gör den pulshade Nd:YAG-lasern till den kanske bästa vid borrning i inte alltför tjocka metaller. Vad som gör den speciellt bra är att våglängden ligger i ett område, där de flesta metaller absorberar bra. Laserns pulsform tycks också vara ganska lämplig.

Användandet av skyddsgaser (se 7.3) spelar också in vid valet av laser. Närvaro av syrgas gör att lägre pulsenergier behövs. Kvaliteten på själva laserstaven kommer också in i bedömningen då denna kan variera en hel del.

Andra lasrar som kan komma i fråga i dessa sammanhang är Nd:Glas och CO_2 . Även dessa bör vara pulshade.

4.2. Nd:Glas-lasern

I denna laser har neodymoxid blandats in i glas. Våglängden är praktiskt taget den samma, 1064 nm, men pulserna kan göras bredare och högre, dvs innehållande mer energi än Nd:YAG-lasern. Fig 1 ger en jämförelse mellan pulsernas utseende.



Figur 1.

Fig. 2.1. Output characteristics of Nd lasers (Battista and Shiner 1976).

Om ingen skyddsgas hade medverkat hade möjligen Nd:Glas, på grund av dess höga pulsenergi, gett bättre hål än Nd:YAG. Dock har Nd:Glas-lasern sämre verkningsgrad, dess stav leder värme sämre och är alltså svårare att kyla och kan därför inte pulsas så snabbt.

4.3. CO₂-lasern

Denna laser är en gaslaser som fungerar genom vibrations-rotationsovergångar. Dess lasringsvåglängd är 10.6 µm och dess effekt kan fås mycket högre än tidigare nämnda lasrar. Dess stora nackdel är dock våglängden ty här absorberar de flesta metaller betydligt sämre än för de tidigare nämnda lasrarna. Dess höga effekt gör att vi istället behöver en skyddsgas som hindrar en alltför kraftig förbränning och samtidigt kyler bra. Just dessa egenskaper har exempelvis helium. CO₂-lasern är bättre för tjocka material.

5. Utveckling inom lasertekniken

Numera är det knappast någon som ifrågasätter huruvida lasern är ett ekonomiskt lönsamt redskap inom materialbearbetningen. Ursprungligen utvecklades speciellt skärning och borrar mycket långsamt. Det visade sig att borrar och skärning med kontinuerlig laser istället för pulsad krävde väldigt höga medeleffekter. Detta på grund av att de flesta metaller uppvisade hög värmekonduktivitet och hög ytreflektion.

Snart utvecklades lasrar med höga effekter men fortfarande var kvaliteten inte tillfredsställande. Det skulle visa sig att pulsad drift var nödvändig.

5.1. Användningsområden

Antalet applikationer med lasrar är många och kommer att bli fler. Detta gäller inte bara materialbearbetning och metaller, men jag berör här bara metallbearbetningen i stora drag.

Skärning, borrar, lötning, svetsning och härdning är några användningsområden. Processerna beror på temperaturen enligt följande: Vi betecknar temperaturen T , materialets smältpunkt T_m , materialets kokpunkt T_b . Då gäller :

$T > T_b$: Borrar, Skärning.

$T_b > T > T_m$: Svetsning.

$T < T_m$: Härdning.

5.2. Forskning på materialbearbetning med laser

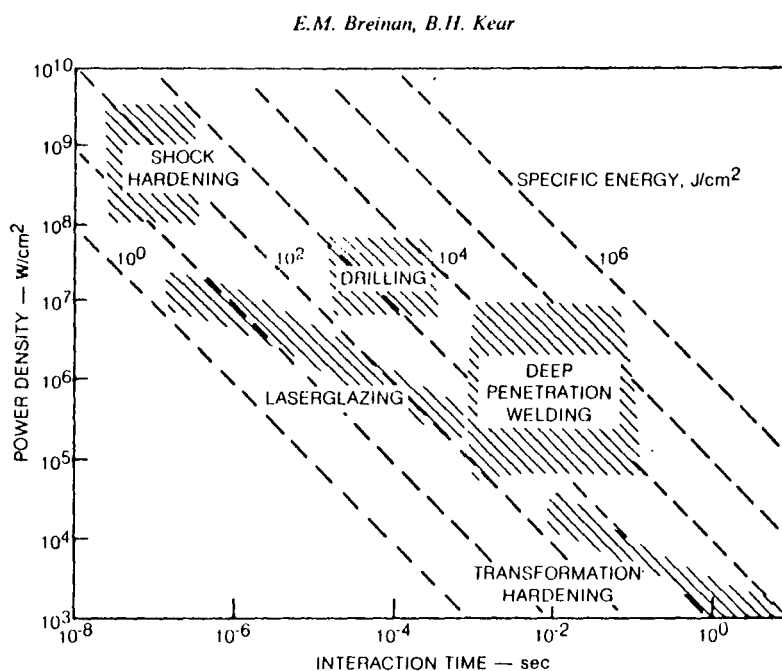
En hel del forskning har lagts ner för att försöka förstå vad som sker vid växelverkan mellan laserstrålen och materialet. Vid skärning med laser sker detta genom: (Kamalu, Steen)

i) Vaporisation. Strålens energi värmer materialet till över kokpunkten och det försvinner i gasform. Detta kräver ca 10 gånger energin i ii)

ii) Smältning och blåsning. Kräver ca 2 gånger energin i iii)

iii) Förbränning i reaktiv gas.

Temperaturen ökar med effekttätheten som beror på laserns uteffekt och optiken. I mina försök var dock optiken och avståndet konstant. Vid konstant optik gäller förhållandet $P = C \frac{E}{t}$, där C är en konstant, P betecknar effekttätheten, E utenergin och t pulsvidden. Detta förhållande åskådliggöres i figur 2.



Figur 2.

Mina försök måste alltså göras inom zonen för borrar (drilling) i figuren. Frågan blir då var i denna zonen de gynnsammaste förhållandena finnes.

Undersökningar av denna typ har gjorts tidigare men resultaten är inte allmänt kända. Försök att få fram empiriska formler med de inblandade parametrarna har gjorts. Någon nu vedertagen formel finns emellertid inte och det har visat sig att praktiska undersökningar varit mer tillförlitliga. Största felkällan i detta sammanhang har varit att strålen blockerats av de under borrarningen bildade slaggprodukterna.

Förutsatt att vi har endast TEM₀₀-mod är strålens diameter d

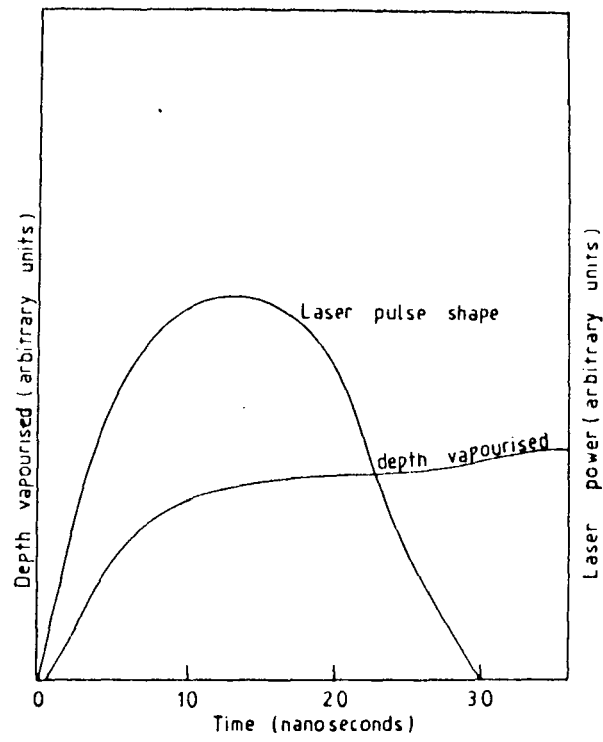
i fokus teoretiskt bestämd till $d = \frac{4\lambda f}{\pi D}$

där λ är våglängden, f linsens fokallängd och D strålens diameter genom linsen.

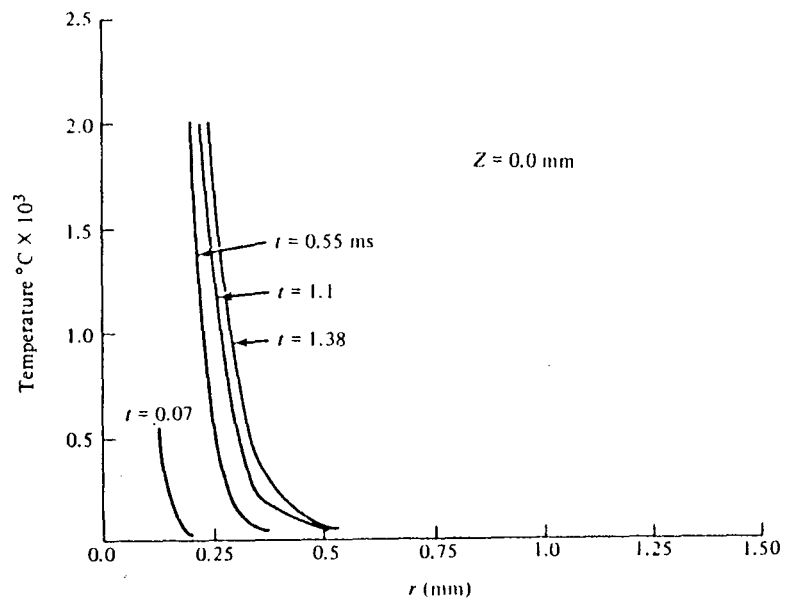
När strålen träffar materialet brukar näraliggande områden också upphettas varför det bildade hålets diameter brukar bli flera gånger större än så. Denna laser ger förutom TEM₀₀ även TEM₀₁ och TEM₁₁ varför man kan vänta sig än större hål. Vid borrarningar brukar man använda linser med kort fokallängd för att få små hål. Det är dock inte så att hålkvaliteten blir bättre ju mindre hålen är. Bland annat rundheten kan bli sämre.

Snabba kameror har använts för att förklara bormekanismen. Härur vet man att största delen av det åstadkomna håldjupet fås i början av pulsen (se figur 3). Temperaturen ökar mycket snabbt så fort pulsen har forcerat reflektionshindret. Temperaturen sjunker dock snabbt radiellt från hålet. Figur 4 visar radiella temperaturvariationen för olika tidpunkter vid en metalls yta.

Av det här förstår vi att pulsens form är av högsta betydelse. Denna beror likaväl på stavens kvalitet som på dess material. Forskning pågår för att finna bästa möjliga pulsform för att utföra borrarningar.



Figur 3. Fig. 2.2 Schematic representation of the history of vapourisation by a Q-switched laser (Ready 1965).

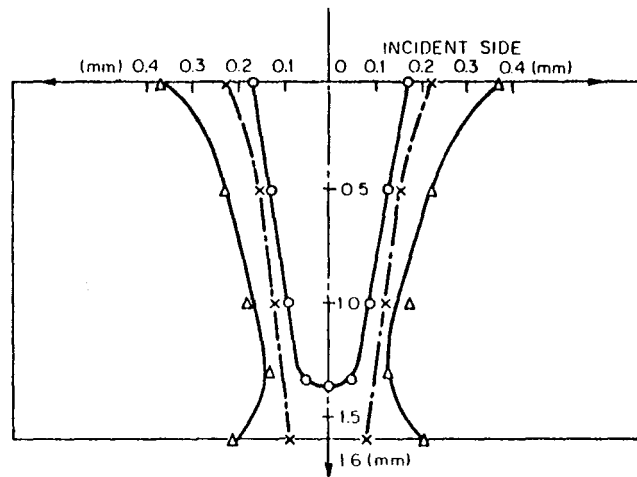


Figur 4. **Figure 4-63 Radial temperature distribution at the surface for various times.**

6. Borrning med lasrar

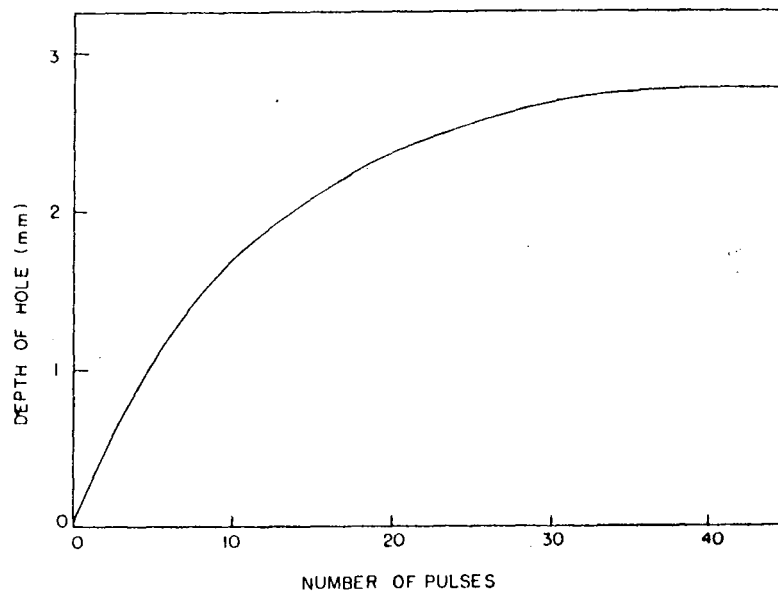
6.1. Percussion drilling

Principen för percussion drilling är enkel. Man fixerar laserstrålen på en punkt på metallen och skickar upprepade pulser tills man kommit igenom densamma. På så sätt blir såväl reflektionshindret som värmeutbredningen mindre än med en kontinuerlig stråle. Hålprofilen varierar med laserns utenergi enligt figur 5. Håldjupet i sin tur beror på antalet pulser enligt figur 6:



Figur 5.

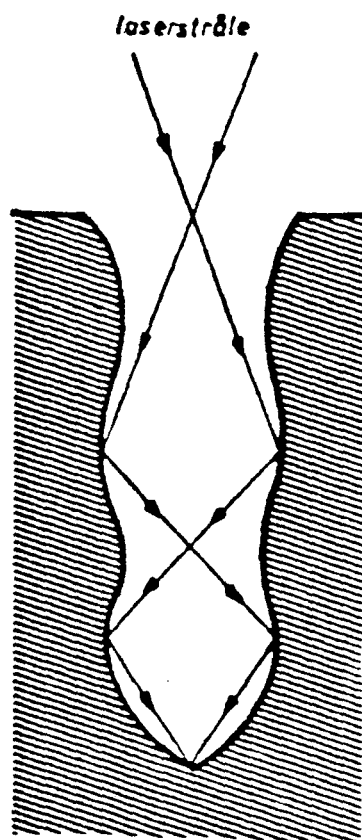
Fig. 16-3 Change in configuration of holes in a 1.6 mm thick aluminum plate as laser output increases. The normal pulse ruby laser beam was focused with a 30 mm focal length lens. Points are as follows: 0, 0.36 J; x, 1.31 J; Δ , 4.25 J. (From T. Kato and T. Yamaguchi, *NEC Res. Dev.* 12, p. 57 (October 1968).)



Figur 6.

Fig. 16-4 Depth of hole drilled in sapphire as a function of the number of pulses. The data are relevant to 2 J ruby laser pulses focused with a 3 cm focal length lens. (Data from S. Shimakawa, Japan Society for Laser Material Processing.)

Percussion drilling har uppvisat en del svagheter. Strålen reflekteras i regel åt olika håll nere i hålet enligt figur 7:

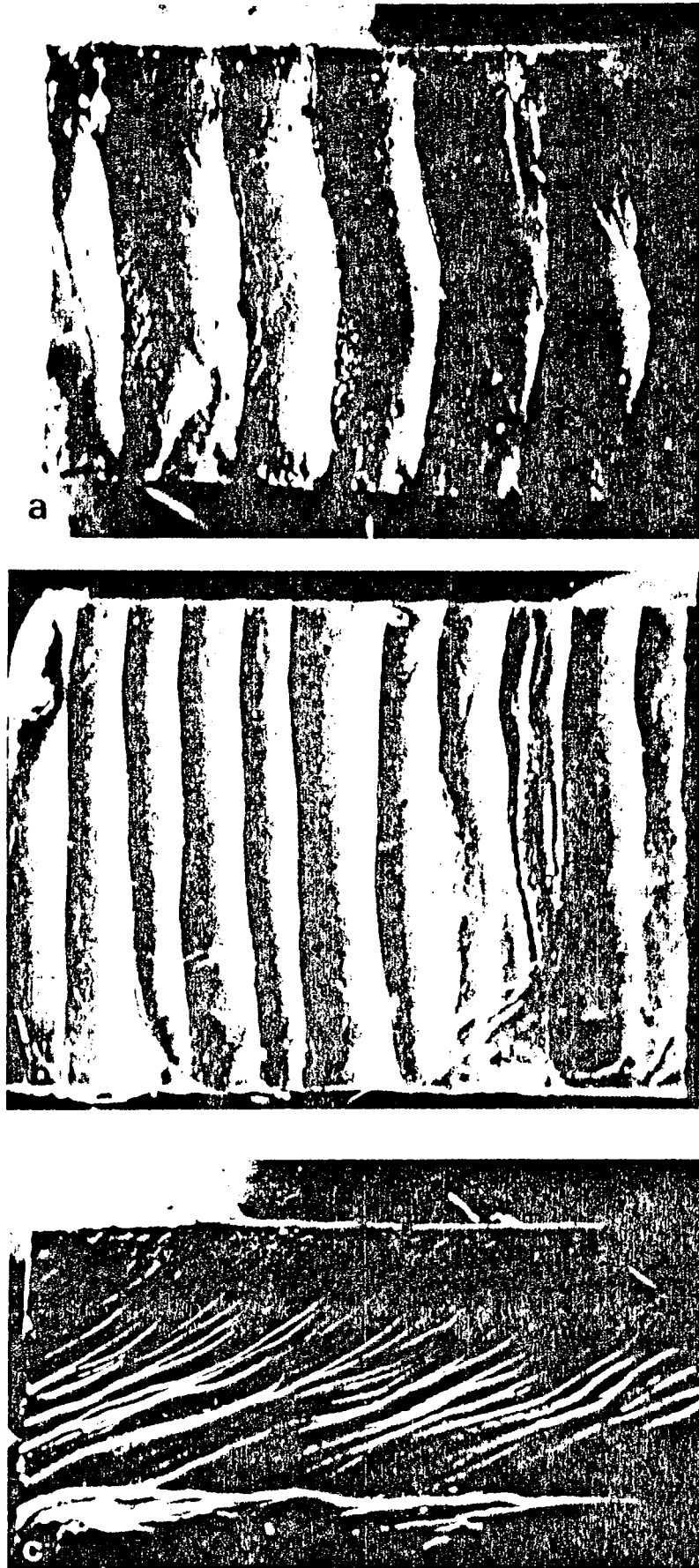


Figur 7.

Dessa reflektioner gör att hålet, förutom att sidan blir ojämn, ofta blir snett och avsmalnande och får tjock recastlayer. Det bildas mer och mer slaggprodukter som blockerar strålen. Detta är några förklaringar till varför ökningen av håldjupet minskar med antalet pulser.

6.2. Skärning med laser

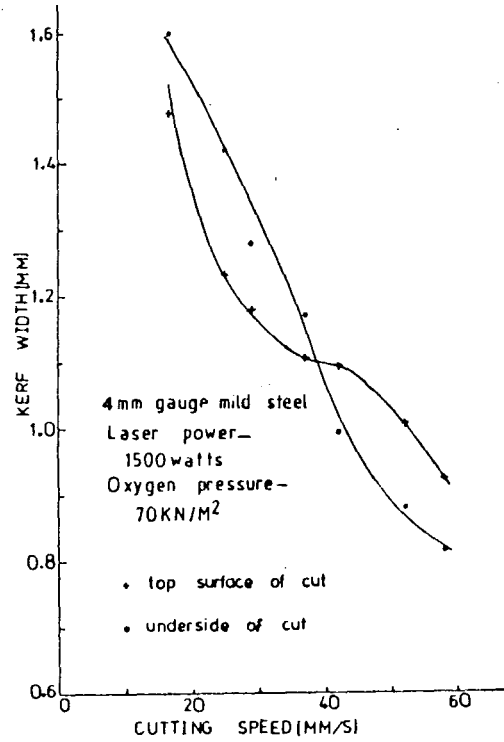
Skärning går också bäst med pulsad laser av samma skäl som för borrar. Vid borrar av riktigt stora hål får man övergå till skärning i cirkel. Då tillkommer en parameter, skärhastigheten. Övre gräns för skärhastigheten är givetvis den hastighet vid vilken strålen nått och jämt tränger igenom. Figur 8 visar hålsidans utseende vid olika skärhastigheter.



Figur 8.

Fig. 2.42. SEM pictures of cut surface showing (a) slow, (b) optimum, and (c) fast cutting speeds.

Även bredden på själva fåran i plåten efter en skärning kan regleras med skärhastigheten, både vad gäller under- och över- sidan. Figur 9 visar denna variation. (kerf width = fårans bredd). Oftast vill vi ha lika brett rakt igenom. Vi vill alltså hitta kurvornas skärningspunkt.

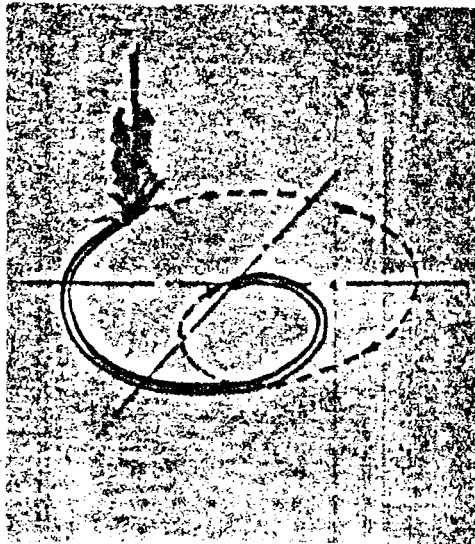


Figur 9.

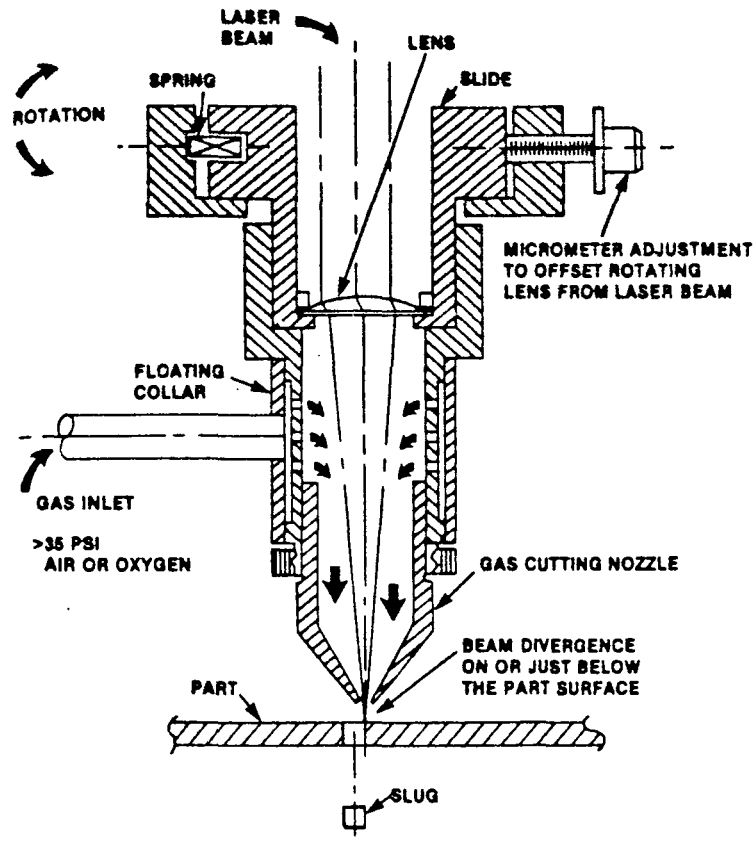
Fig. 2.39: Variation of kerf width with cutting speed.

6.3. Trepanning

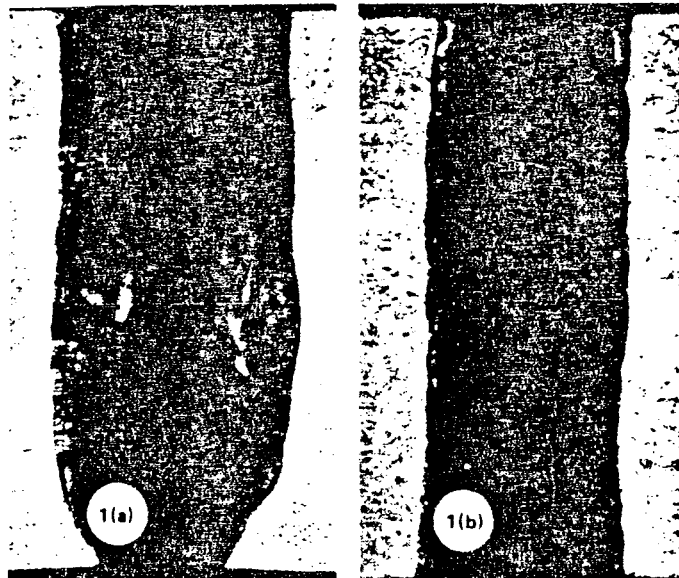
Trepanning kan sägas vara ett mellanting av borrar och skärning. Denna metod användes i min undersökning. Den innebär att linsen roteras på automatisk väg och skär loss en cirkulär bit. Skärvägen visas i figur 10 och principen för trepanning i figur 11.



Figur 10.



Figur 11. *Trepanning provides a way to control hole diameter tolerances by using a rotating lens that can be offset from the beam axis by micrometer adjustment.*



Figur 12. **Figure 1. Laser-drilled holes nominally 0.033 inch diameter in Hast-alloy-X, 0.100 in. thick. (a) Percussion drilled hole; (b) Trepanned hole.**

Med denna metod blir hålkvaliteten bättre i de flesta avseenden. Hålen blir mycket jämnare och mindre avsmalnande än för percussion, (se fig 12).

Begränsningen med trepanning är räckvidden. För håldiametrar under 0.45 mm är percussion drilling att föredra och över 2.5 mm bör man skära vanligt i cirkel. Den största åstadkomna diametern med trepanning är 12.5 mm. (Terrel 1982)

7. Krav på hålkvalitet och ingående parametrar

De primära kraven vi ställer på borrhålens kvalitet är sprickfritt och minimal recastlayer samt vid borrhning med syrgas som skyddsgas, minimalt oxidskikt.

Andra krav vi ställer fast med något lägre prioritet är jämna och parallella sidor och jämna hörn vid hålets utgång.

Antalet möjliga ingående parametrar är stort och de beror ofta på varandra. Följande parametrar höll vi konstanta:

Plåtens tjocklek: 2 mm

Håldiameter: 1 mm

Antal skurna varv: 2 (ca 6.3 mm skärväg)

Penetrationstid: 0.2 s (dvs tiden för att med percussion drilling göra ett genomgående hål i centrum)

Linsens fokallängd: 80 mm

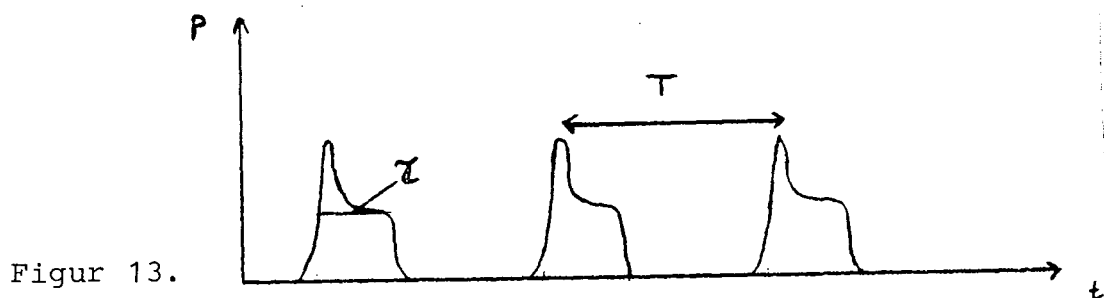
Avstånd nozzle-plåt: 2.7 mm

(dvs fokus mittemellan plåtens över- och undersida)

De parametrar som har varierats sammanfattas nedan.

7.1 Pulsvidden

Pulsvidden eller pulsformen är en viktig parameter i sammanhanget. Figur 13 visar exempel på ett pulståg. Höjden på pulsen ger dess effekt P , pulsens area dess energi, pulsfrekvensen f antal pulser per sekund. Tiden T är tiden mellan två pulser, $T = \frac{1}{f}$, T är pulsvidden dvs halvvärdesbredden.



Pulsvidden är proportionell mot den tid som varje puls "reagerar" med metallen. För skärning och borrning bör man lämpligen ligga i området 0.25-1.2 ms i pulsvidd.

7.2. Frekvensen

Med frekvensen menar vi antalet pulser per sekund. Generellt kan sägas att för låg frekvens ger ojämna och allmänt dåliga hål. Vid för hög frekvens kommer strålen att mer likna en kontinuerlig stråle, dvs värmeutbredningen blir för kraftig vilket är det sämsta som kan hända.

Som tidigare nämnts är vissa parametrar beroende av andra. Detta gäller i högsta grad för frekvensen. Det visar sig att för att få lasring måste produkten $f \cdot T$ ungefärligen befinna sig i området 30-36 Hz*ms.

7.3. Skyddsgaser

Dessa har en viktig funktion att fylla. Gasen i fråga skickas in i "gas cutting nozzle" nedanför linsen enligt figur 11. Den fungerar härvid som skydd för linsen vilket är viktigt eftersom man brukar ha linser med kort fokallängd vid borrar och linsen hamnar ju då nära materialet. En annan uppgift är att blåsa ut slagprodukter ur hålet.

Vilka gaser är då aktuella som skyddsgaser? Luft kan användas men vanligare är helium, argon och syrgas. Helium är som tidigare nämnts bäst vid höga energier varför det fick förkastas med en gång. Strålen hade helt enkelt svårt att ta sig igenom.

Argon gick bättre än helium. Det gick ganska lätt att komma igenom plåten men det bildades en tjock recastlayer. En möjlig förklaring till detta är att argon är tyngre än helium.

Överhuvudtaget är dessa gaser bäst vid höga effekter där vi vill hindra att kraftiga förbränningar äger rum.

Syrgas intar en särställning i och med att det reagerar med metallen och svarar för ca 70 % av borrenergien. Det visar sig vara bättre med låg energi i kombination med förbränning i syrgas än att ha hög energi från början. Det blir mindre värmeutbredning och smalare skärbredd.

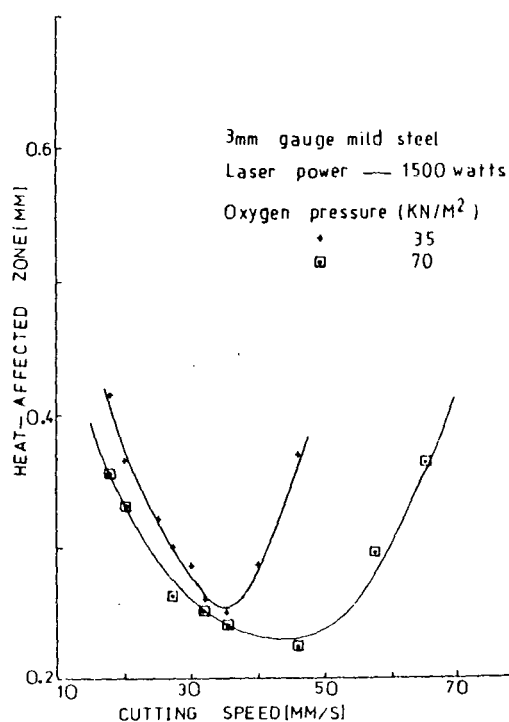
Rent teoretiskt borde klorgas kunna vara ännu effektivare. Även den reagerar med metallen och den är tyngre än syrgasen. Klorgas är dock giftig och de bildade gaserna väldigt flyktiga varför de praktiska svårigheterna torde bli för stora.

Beträffande gastrycket kunde vi maximalt komma upp i 8-9 bar på tryckmätaren vilket som väntat visade sig vara mest gynnsamt.

7.4. Skärhastigheten

Som tidigare har nämnts kunde vi påverka själva skärbredden med hastigheten. En annan för oss mycket intressantare parameter är värmeutbredningen. Fig 14 visar hur den värmepåverkade zonen varierar med skärhastigheten. Vi är intresserade av att finna den hastighet som ger minimalt värmepåverkad zon.

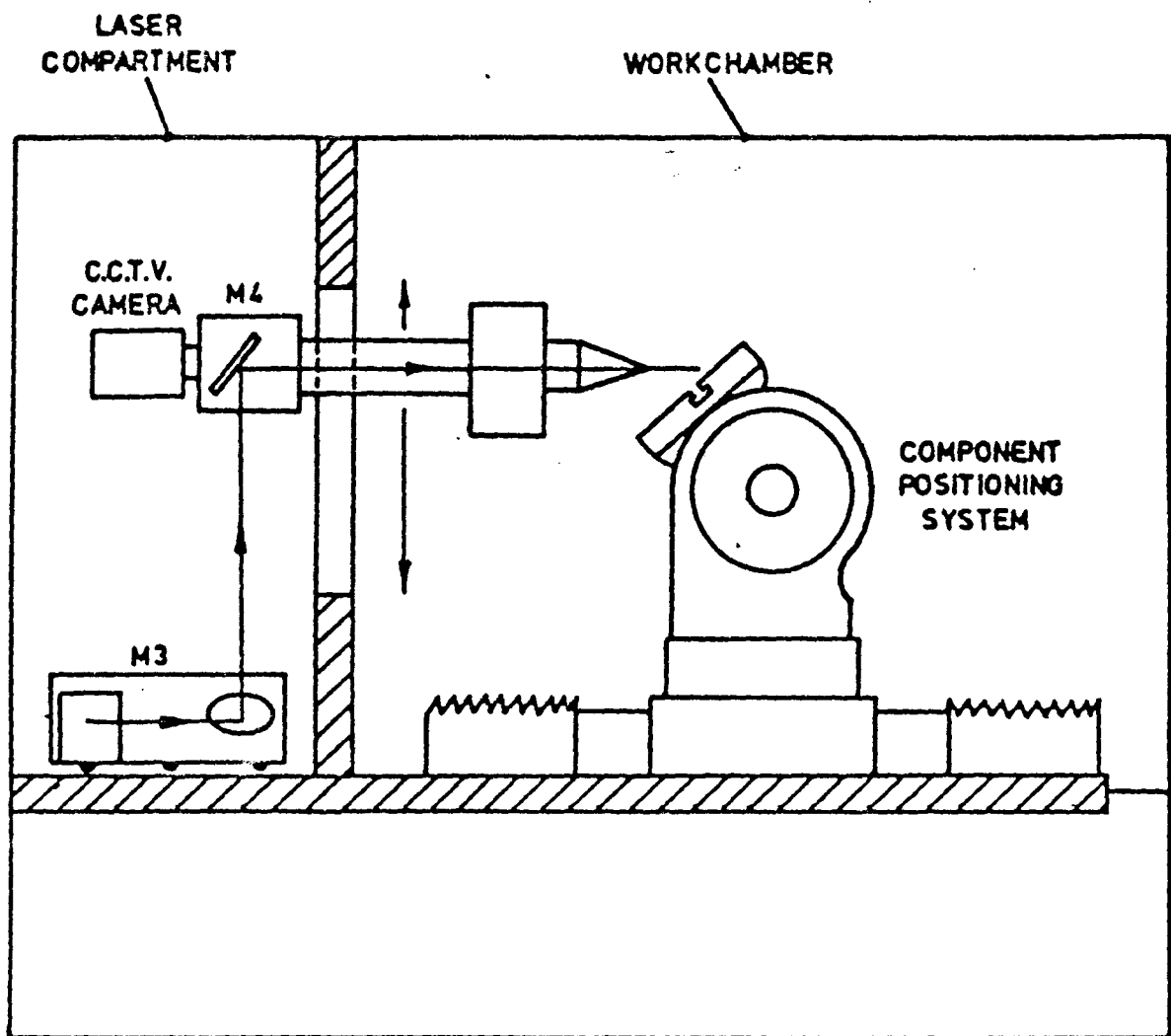
W.M. Steen, J.N. Kamalu



Figur 14. Fig. 2.43. Variation of heat affected zone with cutting speed.

Vi använde skärhastigheterna i mm/min: a) 75 b) 110 c) 150 d) 175 e) 200. Skärvägen var hela tiden ca 6.3 mm och penetrationstiden 0.2 s. Om vi har pulsfrekvensen 60 Hz innebär detta för respektive hastighet i tid och antal pulser räknat.

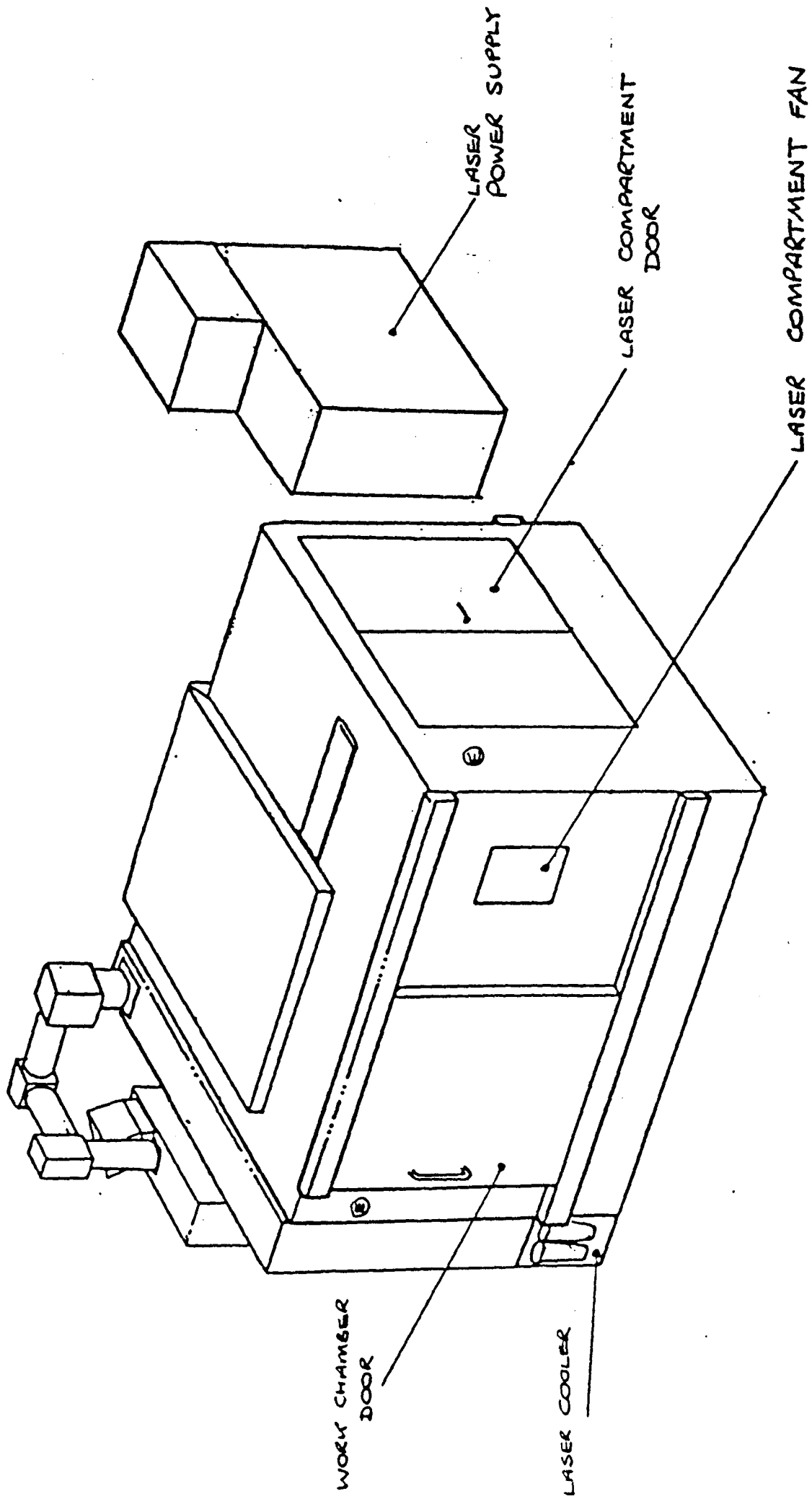
- a) 5.2 s, 310 pulser
- b) 3.6 s, 220 pulser
- c) 2.7 s, 160 pulser
- d) 2.4 s, 140 pulser
- e) 2.1 s, 120 pulser



Figur 15.

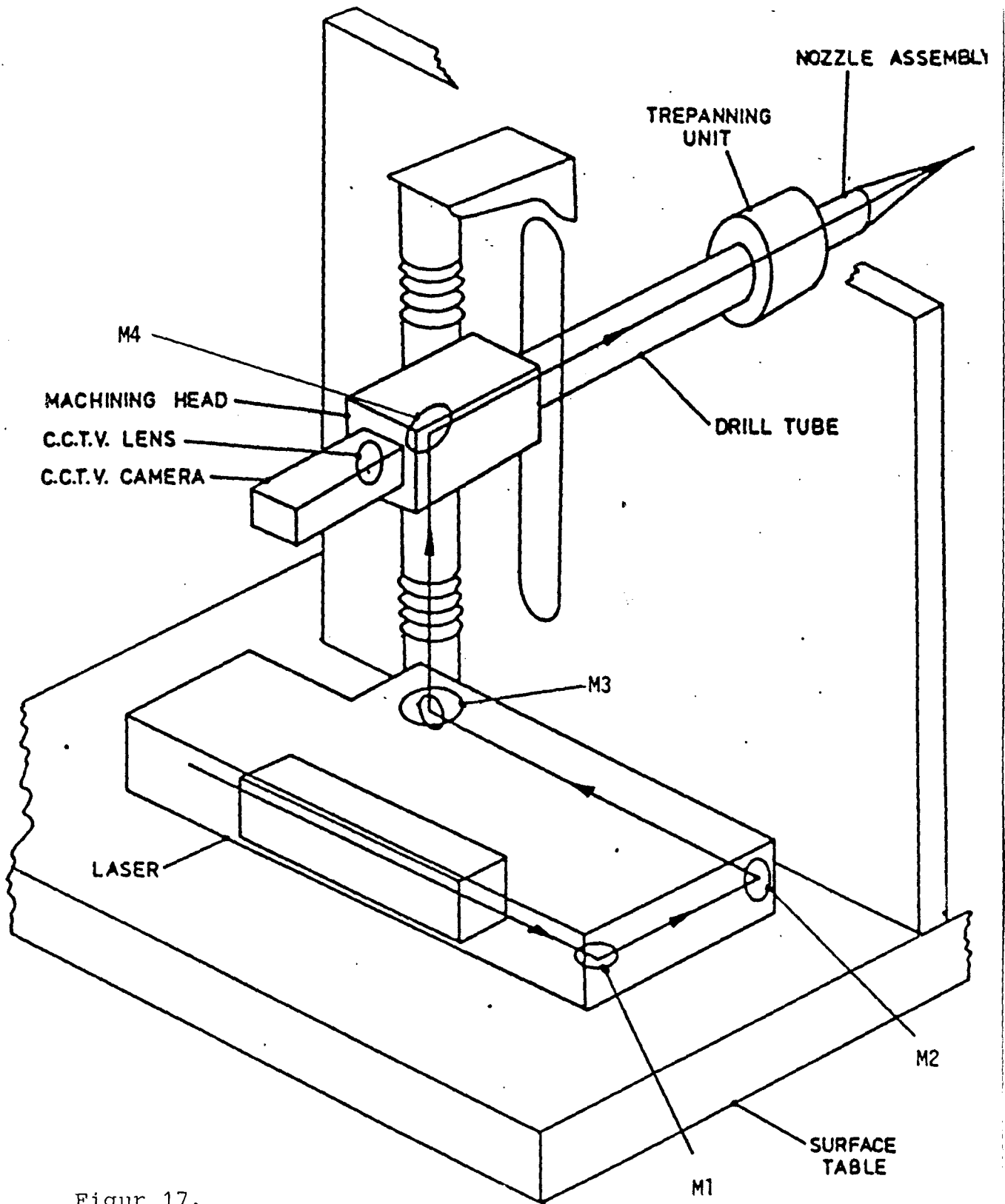
Basic Machine Components

ⓔ - EMERGENCY STOP



EXTERNAL VIEW (REAR)

Figure 16.



Figur 17.

Laser and Beam Optics

8. Uppställningen

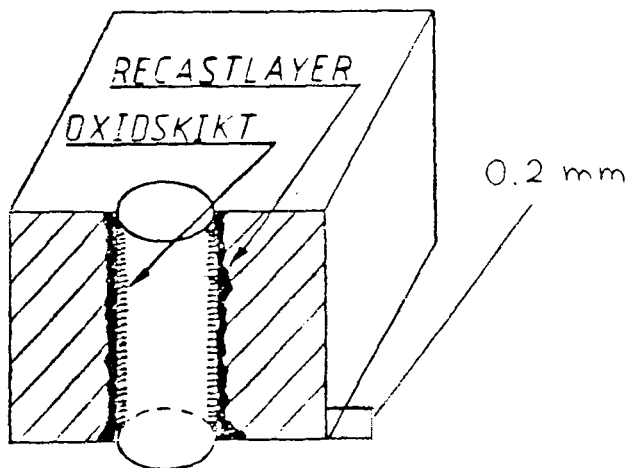
Själva uppställningen framgår av fig 15. Materialet är placerat i en arbetskammare (workchamber). Utifrån ser denna ut enligt figur 16. Vid borrning eller skärning stängs dörrarna och pumpen sätts igång för att evakuera bildade gaser. Figur 17 visar hela lasern med dess stav, speglar och trepanningenshet. Denna och anordningen på vilken materialet är fastsatt styrs på automatisk väg. Laserns medeleffekt är 300 W, frekvensen kan varieras 0-99 Hz i steg om 1 Hz och pulsvidden 0-9.9 ms i steg om 0.1 ms.

9. Utförande

I sökningen efter lämpliga parametrar försökte vi gå systematiskt tillväga genom att först göra ett antal borrningar och undersöka dessa. Därefter gjorde vi nya borrningar på grundval av undersökningarnas resultat. Detta förfarande upprepades flera gånger. I grova drag började vi med syrgas och varierade pulsvidden i området 0.5-1.2 ms och för varje pulsvidd testade vi alla möjliga frekvenser och varierade härigenom effekten. Dessutom gjordes borrningar med andra gaser och gastryck samt olika skärhastigheter som nämnts tidigare.

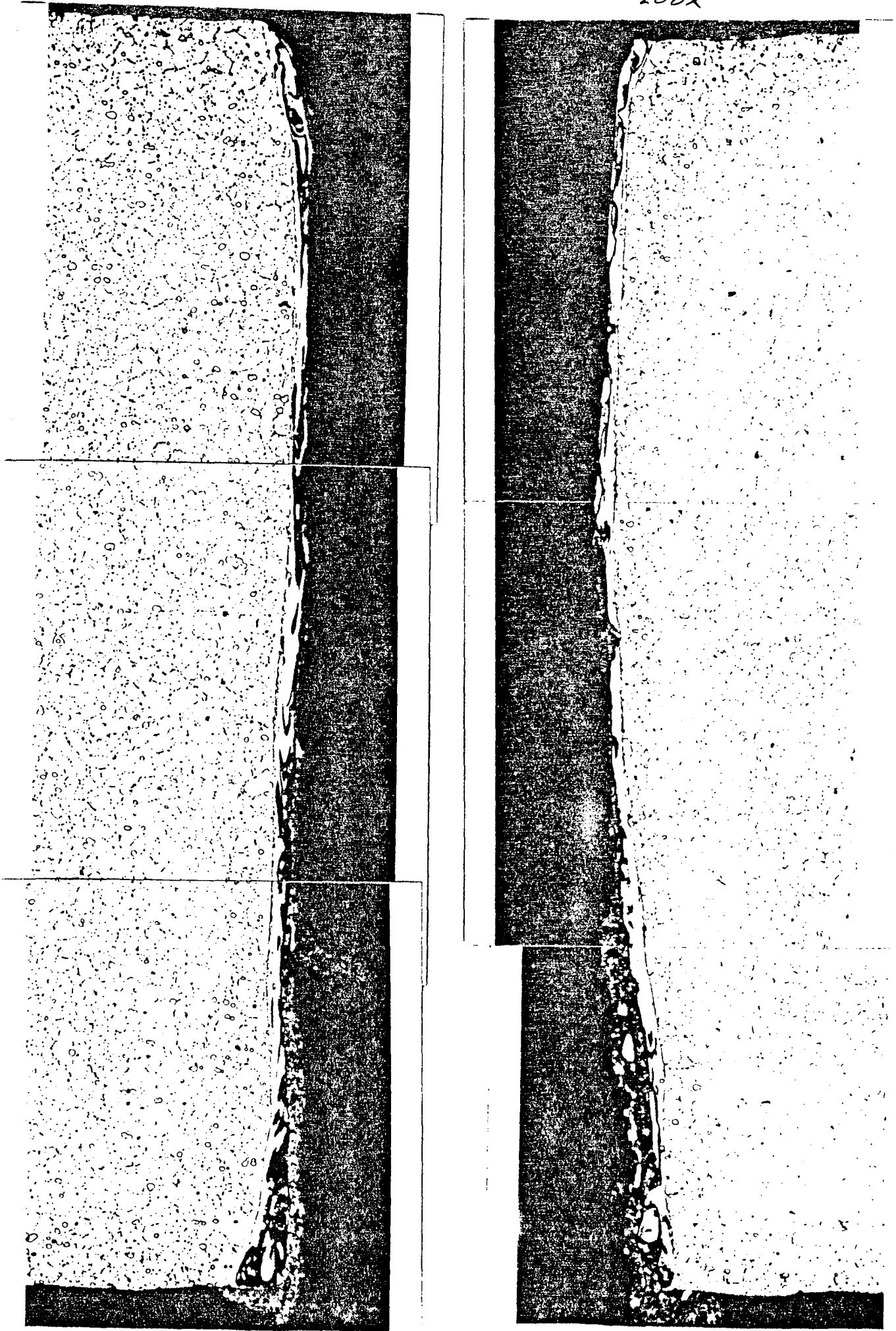
För varje parameterkombination gjordes 4 borrningar då dessa kunde göras snabbt på automatisk väg. Av dessa utvalet de till synes 2 bästa hålen för närmare undersökning.

Borrhålen undersöktes i optiskt mikroskop på Volvo Flygmotors laboratorium. Detta föregicks av tillskärning av plåtarna så vi fick 2 hål på varje bit. Sedan rengjordes dessa i syrabad i en ultraljudsvibrator.



Figur 18.

200X



Figur 18

Figur 18 visar schematiskt utseendet på ett borrhål med dess oxidskikt och recastlayer. Vanligtvis brukar nedre, dvs utgående, sidan ha tjockast oxidskikt och recastlayer varför vi, som markerats i figuren slipade 0.2 mm på undre sidan. Sedan etsade vi och undersökte hålen i mikroskop.

Vid sammanställningen i appendix anges sammanlagda antalet sprickor in i grundmaterialet för 2 hål och längden på den längsta sprickan. Kolumnen för tjockleken på oxidskikt och recastlayer avser största funna tjockleken i de två hålen.

Figur 19 visar ett fotografi taget i ett mikroskop med 200 gångers förstoring. Strålen har kommit uppifrån och som synes har utgångssidan tjockast oxidskikt och recastlayer.

Observera att bilden tryckts ihop. Håldiametern skall vara hälften av plåttjockleken.

10. Utvärdering

Av resultaten att döma tycks förekomsten av recastlayer och sprickor följas åt vilket ej är konstigt ty de beror i hög grad på värmeutbredningen.

Det är tydligt att syrgas är den bästa skyddsgasen i det här fallet. Nackdelen är att ett oxidskikt uppkommer. Detta kan avlägsnas på kemisk väg men innebär förstås att ett ytterligare moment måste utföras.

Beträffande gastrycket visar det sig att, största möjliga tryck i vår apparat är bäst, 8-9 bar. Detta var väntat ty då blåses hålet igenom ordentligt. Beträffande oxidskiktet framträder dock ingen tydlig skillnad för olika tryck.

Erfarenhetsmässigt bör pulsvidden ligga i området 0.5-1.2 ms. Nedre delen av detta området fann vi vara bäst, dvs 0.5 ms pulsvidd. Detta innebär pulsenergi på ca 2 J, vilket avlästes på instrumentpanelen. För denna pulsvidd kunde vi variera frekvensen mellan 57 och 66 Hz. Det framgår här rätt klart att nedre delen av detta intervall är bäst, dvs högsta möjliga pulsenergi för 0.5 ms pulsvidd.

Enligt figur 14 skall ett minimum finnas för värmeutbredningens variation med skärhastigheten men något sådant kan knappast skönjas.

En del konkreta åtgärder för förbättring finns föreslagna. Terrell (1976) redogör för borrarborringar gjorda på Solar Turbines Inc. Här hittade man ett (hemligt) material som smordes på undre sidan av plåten innan borrarborringen. Detta gjorde att kantens ojämnheter (se figur 19) blev till ett pulver som lätt kunde tvättas bort med vatten.

Steen och Kamalu nämner att en del lovande resultat uppnåtts genom att under borrarborring blåsa ämnen i hålet som sänker smälttemperaturen och viskositeten hos slaggprodukterna. Lime (kalciumoxid) nämns som exempel. Nackdelen med metoden är ökad värmebelastning och att den blir väldigt kostsam.

Man lär också kunna öka borrarborrdjupet genom ultraljudsvibrationer. Mori och Kumehara (1976) åstadkom 10 % ökning av hålddjupet genom att vid borrarborring med en 5J rubinlaser sätta borrarborrföremålet i ultraljudsvibration med en amplitud på 25 µm.

Den parameterkombination som visat sig bäst vid borrarborring i 2 mm tjock Hastalloy-X plåt är ungefärligen.

Pulsvidd: 0.5 ms

Frekvens: 60 Hz

Pulsenergi: 2.2-2.4 J

Skyddsgas: syrgas

Gastryck: 8-9 bar

Den första undersökningen med dessa parametrar gav förhållandevis tunn recastlayer och dessutom sprickfritt. Dock fann vi vid en kompletterande undersökning att det inte var helt sprickfritt varför en helt tillfredsställande lösning på problemet ej uppnåtts.

11.Appendix

Mätvärdessammanställning.

Försök 1

Skyddsgas: Syrgas

Gastryck: 6 bar

Skärhastighet: 55 mm/min

Plåtens kornstorlek: 60-75 μm

	Puls- frekvens (Hz)	Puls- vidd (ms)	Puls- energi (J)	Recast- layer (μm)	Recast+ oxid (μm)	Antal sprickor	Djupaste spricka (μm)
1	27	1.1	4.6	55	86	4	35
2	28	1.1	4.4	58	97	0	0
3	29	1.1	4.1	60	113	2	33
4	30	1.1	4.1	50	74	2	48
5	31	1.1	3.8	37	68	4	25
6	32	1.1	3.7	40	80	1	25
7	33	1.1	3.5	43	50	4	35
8	34	1.1	3.7	39	55	4	29
9	35	1.1	3.3	33	58	1	13
10	36	1.1	3.4	39	58	2	29
11	26	1.2	4.8	55	88	0	0
12	27	1.2	4.6	49	109	2	50
13	28	1.2	4.3	40	90	1	13
14	29	1.2	4.1	45	90	1	9
15	30	1.2	3.9	53	78	3	42
16	31	1.2	3.6	29	85	2	27
17	32	1.2	3.5	58	110	2	27
18	33	1.2	3.4	40	85	1	43
19	34	1.2	3.2	35	63	2	39
20	35	1.2	3.1	58	86	2	25

Försök 2

Skyddsgas: Syrgas

Skärhastighet: 120 mm/min

Plåtens kornstorlek: 40-45 μm

Gastryck: 6 bar utom hål 11-13 och 24-28 8 bar

	Puls- frekvens (Hz)	Puls- vidd (ms)	Puls- energi (J)	Recast- layer (μm)	Recast+ oxid (μm)	Antal sprickor	Djupaste spricka (μm)
1	56	0.6	2.4	40	50	2	10
2	57	0.6	2.3	50	75	2	10
3	58	0.6	2.3	45	60	0	0
4	59	0.6	2.3	25	55	4	12
5	60	0.6	2.2	55	60	3	6
6	61	0.6	2.2	50	65	2	20
7	62	0.6	2.1	65	75	1	20
8	63	0.6	2.1	50	70	5	20
9	64	0.6	2.0	35	50	0	0
10	65	0.6	2.0	35	45	3	10
11	58	0.6	2.3	45	75	0	0
12	59	0.6	2.2	40	50	2	14
13	60	0.6	2.2	40	50	1	12
14	57	0.5	2.4	30	35	0	0
15	58	0.5	2.2	50	50	0	0
16	59	0.5	2.3	50	60	1	12
17	60	0.5	2.2	30	40	0	0
18	61	0.5	2.2	40	45	0	0
19	62	0.5	2.2	50	60	3	4
20	63	0.5	2.2	50	60	5	12
21	64	0.5	2.1	40	50	3	18
22	65	0.5	2.1	40	50	5	5
23	66	0.5	2.1	45	75	1	14
24	58	0.5	2.4	30	40	0	0
25	59	0.5	2.1	25	40	0	0
26	60	0.5	2.2	25	40	0	0
27	61	0.5	2.2	25	40	0	0
28	62	0.5	2.2	40	50	0	0

Försök 3

Skyddsgas: Argon

Plåtens kornstorlek: 45-50 μm

Pulsvidd: 0.5 ms

	Puls- frekvens (Hz)	Gas- tryck (bar)	Puls- energi (J)	Recast- layer (μm)	Skär- hastighet (mm/min)	Antal sprickor	Djupaste spricka (μm)
1	57	8	2.4	60	150	5	5
2	58	8	2.3	60	150	0	0
3	59	8	2.2	55	150	0	0
4	60	8	2.2	50	150	5	7
5	61	8	2.2	50	150	5	9
6	57	9	2.4	40	75	4	7
7	58	9	2.3	40	75	0	0
8	59	9	2.2	60	75	2	7
9	60	9	2.2	73	75	1	5
10	61	9	2.1	53	75	1	3
11	57	9	2.3	50	110	0	0
12	57	9	2.3	73	175	0	0
13	57	9	2.3	60	200	0	0
14	58	9	2.2	50	110	2	6
15	58	9	2.2	65	175	1	6
16	58	9	2.2	50	200	2	12
17	59	9	2.3	53	110	3	9
18	59	9	2.3	63	175	2	5
19	59	9	2.3	63	200	0	0
20	60	9	2.1	63	110	1	5
21	60	9	2.1	40	175	0	0
22	60	9	2.1	50	200	0	0

12. Referenser

S R Bolin, Nd:YAG laser applications survey, 429-437. (M Bass, 1983 Laser Material Processing, N. Holland Publ. Comp.)

S Borgström, 1985, Laserfysik, Kompendium, LTH, 6-1, 8-3, 9-4.

E M Breinan, B H Kear, Rapid Solidification Laser Processing, 238, (M Bass, 1983, Laser Material Processing, N. Holland Publ. Comp.)

M K Chun, K Rose, 1970, Interaction of High-Intensity Laser Beams with Metals, J. Appl. Phys. (Feb.) 41 No. 2, 614-620.

S L Engel, 1978, Laser Job Shopping Using Today's Technology, Opt. Eng. (USA) (May-June) 17 No 3, 235-236.

F P Gagliano, R M Lumley, L S Watkins, 1969, Lasers in Industry, Proc. IEEE. 57, 114-115.

J N Kamalu, W M Steen, Laser cutting, 16-111.

T W Naugler, Applications of Pulsed Solid State Lasers, Electro Optics/ Laser 78, 102-104.

J F Ready, 1978, Industrial Applications of Lasers, (Academic, New York), 399-415.

N E Terrell, 1982, Laser Precision Small Hole Drilling, Manufacturing Engineering, 76-77.