

KTH Kandidatarbete

Plasmaskärning: Metod, användning & utvecklingsmöjligheter

Handledare: Jan-Olof Swebéus

Simon Alfredsson 870911-0038
Fredrik Tengdelius 871008-0154
2010-06-06

Sammanfattning

Plasmaskärning är en form utav skärande bearbetning i metall med hjälp av en plasmastråle som smälter ett skärnitt i arbetsstycket. Plasmastrålen bildas genom att en elektrisk båge mellan elektroden i verktyget och arbetsstycket värmer upp en skärgas till ett plasmatillstånd. På grund av den elektriska urladdningen mellan elektroden och arbetsstycket så måste materialet som bearbetas vara elektriskt ledande.

Denna rapport ämnar grundligt redogöra plasmaskärning som skärmetod. Plasmaskärning är en av tre termiska skärningsmetoder (det finns även laser- och gasskärning). Rapporten behandlar kortfattat uppkomsten och den historiska utvecklingen för metoden. Därefter utreds grundligt skärprocessen samt de olika nyckelkomponenternas roll och tekniska funktion. De nyckelkomponenter som vi identifierade är; skär- och skyddsgas, elektrod, munstycke samt kringutrustning. Vidare diskuteras vilka risker och säkerhetsproblem som är förknippade med plasmaskärning. Ekonomiska aspekter och begränsningar påverkar metodens användningsområde. För att utreda när plasmaskärningsmetoden är bäst lämpad har vi därför valt att göra en jämförelse med andra termiska skärmetoder. Plasmaskärning har ett brett användningsområde men lämpar sig bäst på arbetsstycken mellan tjocklekarna 10 och 20 mm.

En kortare marknadsundersökning genomfördes och presenteras i arbetet med syftet att klargöra på vilka grunder industrin valt typ av skärmetod samt hur de använder sig av den idag. Med hjälp av marknadsundersökningen jämför vi om det teoretiska användningsområdet stämmer överens med det praktiska ute på svenska industrier. Genom vår marknadsundersökning anser vi att många företag skulle kunna byta metod och därmed förbättra sin produktion främst med avseende på ekonomin.

Slutligen framförs våra tankar kring potentiella utvecklingsmöjligheter för metoden som skulle kunna utöka dess konkurrenskraft jämfört med andra skärmetoder. Dessa diskuteras endast översiktligt och är tänkta som uppslag för vidare forskning inom området. Exempel på några av de utvecklingsmöjligheter som vi identifierat är; bearbetning av icke-ledande material med hjälp av en icke överförd ljusbåge, öka energitätheten i plasmastrålen genom att minimera munstyckets håldiameter, minimera risken för dubbelbåge genom bättre isolering av komponenterna i munstycket.

Abstract

Plasma arc cutting is a form of metal cutting using a plasma arc that melts a kerf through the work piece. The plasma arc is created by an electrical discharge between the electrode in the tool and the work piece which heats up the cutting gas to a plasma state. Due to the discharge between the electrode and the work piece, the material must be electrically conductive.

This report aims to thoroughly explain the plasma arc cutting method. Plasma arc cutting is one of three thermal cutting methods (the other two methods are laser- and oxyfuel cutting). The report briefly sums up the origin and historical development of the method. The cutting process and the different key components and their technical function are then discussed. We identified the key components to be; cutting- and shielding gas, electrode, nozzle and peripheral equipment. Plasma arc cutting raises some environmental and safety problems which we discuss. The economical aspects and its limitations affect the usage area of the method. To clarify when plasma arc cutting is preferred we have chosen to compare these aspects with other thermal cutting methods. Plasma arc cutting has a broad usage area but is best suited on work pieces between 10 to 20 mm in thickness.

A shorter survey was rendered and is presented in the report with the intention to clarify on which basis the industry made their decision when choosing method of cutting and how they use it today. Based on the survey we compared if the Swedish industry uses the cutting methods in accordance with the theory. Based on our survey we think that a lot of companies could change their method of cutting and thereby improve their production, mainly in terms of economy.

Finally we propose a few suggestions for potential development regarding the plasma arc cutting method, which we think would increase its competitiveness against other methods of cutting. These suggestions are only discussed briefly and are to be considered as ideas for further research in this area. Examples of the potential development areas that we identified are; cutting of non electrical conductive materials by using a non transferred arc, increase the energy density by decreasing the nozzles bore, minimize the risk of double-arcing by better insulation between the components in the nozzle.

Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	II
ABSTRACT	III
INNEHÅLLSFÖRTECKNING.....	IV
1 BAKGRUND OCH PROBLEMFORMULERING	1
2 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	1
3 METOD OCH KÄLLKRITIK	1
4 PLASMASKÄRARENS HISTORISKA UTVECKLING.....	3
5 GRUNDLÄGGANDE TEKNISKA EGENSKAPER FÖR PLASMASKÄRNING.....	4
5.1 ÖVERSIKTIG TEKNISK BESKRIVNING	4
5.2 TÄNDA PILOTJUSBÅGEN	4
5.2.1 <i>Retract-starting</i>	4
5.2.2 <i>HF generator</i>	5
5.3 ÖVERFÖRING AV PILOTJUSBÅGEN TILL ARBETSSTYCKET	5
5.4 SKÄRNING OCH DESS FÖRFARANDE	5
6 PLASMASKÄRARENS NYCKELKOMPONENTER OCH DESS FUNKTIONER	6
6.1 SKÄRGASENS/PLASMAGASENS FUNKTION	6
6.1.1 <i>Kemisk reaktionsförmåga</i>	6
6.1.2 <i>Entalpi</i>	7
6.1.3 <i>Priser på skärgaser</i>	7
6.1.4 <i>Vanliga skärgaser för svart stål, rostfritt stål och aluminium</i>	7
6.2 SKYDDANDE MEDIUM – GAS ELLER VATTEN	8
6.2.1 <i>Ökar plasmastrålens energitäthet</i>	8
6.2.2 <i>Skyddar plasmastråle, elektrod samt arbetsstycke mot omgivande atmosfär</i>	8
6.3 MUNSTYCKET OCH DESS FUNKTION	8
6.3.1 <i>Munstyckets bas</i>	9
6.3.2 <i>Swirl ring</i>	9
6.3.3 <i>Dysa</i>	9
6.3.4 <i>Inre dysa</i>	9
6.3.5 <i>Yttre dysa</i>	10
6.3.6 <i>Sköld</i>	10
6.3.7 <i>Magnet</i>	10
6.4 ELEKTRODEN OCH DESS FUNKTION.....	10
6.4.1 <i>Materialval</i>	10
6.4.2 <i>Låg termisk resistivitet – förmåga att leda elektrisk ström</i>	11
6.4.3 <i>Termisk emission – då elektronerna kan lämna elektroden</i>	11
6.4.4 <i>Hög smälttemperatur samt god värmeledningsförmåga</i>	12
6.4.5 <i>Beständighet mot erosion – beror på materialval och omgivande atmosfär</i>	12
6.5 ÖVRIG UTRUSTNING	12
6.5.1 <i>Högfrekvensgenerator</i>	12
6.5.2 <i>Strömkälla</i>	12
6.5.3 <i>Skärbord och montering</i>	12
6.5.4 <i>Styrsystem</i>	13
7 KVALITÉ PÅ SKÄRSNITTET	13

8	MILJÖPÅVERKAN – UTSLÄPP OCH SÄKERHETSRISKER	14
9	BEGRÄNSNINGAR OCH PROBLEM	15
9.1	ELEKTRISKT LEDANDE MATERIAL.....	15
9.2	HEAT AFFECTED ZONE	15
9.3	VINKEL PÅ SKÄRET.....	15
9.4	SLAGG	16
9.5	DUBBELBÅGE	17
9.6	GENOMSLAG OCH KONTURPROBLEM	17
9.7	EROSION PÅ ELEKTRODEN	18
9.7.1	<i>Erosion vid kontinuerlig drift</i>	<i>18</i>
9.7.2	<i>Cyklisk erosion</i>	<i>19</i>
9.8	ARBETSSTYCKETS TJOCKLEK	20
10	PLASMASKÄRARENS ANVÄNDNINGSMÖJLIGHETER, JÄMFÖRELSE MED ANDRA TERMISKA SKÄRMETODER ..	20
10.1	ÖVERGRIPANDE EKONOMISKA ASPEKTER FÖR TERMISK SKÄRNING	20
10.2	ANVÄNDNINGSMÖJLIGHETER	21
11	ANVÄNDNING AV TERMISKA SKÄRMETODER I INDUSTRIEN	22
11.1	FÖRETAG MED LASERSKÄRARE	22
11.2	FÖRETAG MED PLASMASKÄRARE	23
11.3	FÖRETAG MED GASSKÄRARE.....	24
12	POTENTIELLA UTVECKLINGSMÖJLIGHETER	24
12.1	ICKE-LEDANDE MATERIAL.....	24
12.2	ÖKA ENERGITÄTHETEN I PLASMASTRÅLEN	24
12.3	MILJÖ OCH SÄKERHET	24
12.4	DUBBELBÅGE	24
12.5	MINIMERA ELEKTRODEROSION	25
12.6	AUTOMATISK MÄTNING AV ELEKTROD.....	25
12.7	ÖKA PLASMASKÄRARENS KAPACITET	25
13	SLUTSATS OCH DISKUSSION	26
	TACK TILL.....	27
	REFERENSLISTA	29
	BILAGOR.....	29
	BILAGA 1 – TABELL ÖVER SKÄRHASTIGHET VID OLIKA STRÖMSTYRKA OCH TJOCKLEK	32
	BILAGA 2 – BILDER PÅ OLIKA DEFEKTER EFTER BEARBETNING MED PLASMASKÄRARE	33
	BILAGA 3 – MARKNADSUNDERSÖKNINGEN	34
	<i>Till företag med plasmaskärare.....</i>	<i>34</i>
	<i>Till företag med laserskärare.....</i>	<i>34</i>
	<i>Till företag med gasskärare.....</i>	<i>34</i>
	BILAGA 4 – SAMMANSTÄLLNING AV MARKNADSUNDERSÖKNINGEN	35
	<i>Laserskärning</i>	<i>35</i>
	<i>Plasmaskärning</i>	<i>36</i>
	<i>Gasskärning.....</i>	<i>37</i>

1 Bakgrund och problemformulering

Termiska skärprocesser innebär att det i materialet som skall bearbetas smälts eller förbränns ett skärnitt genom upphettning. Allteftersom termiska skärprocessers precision och kapacitet utvecklats de senare åren har företag fått tillgång till allt fler konkurrenskraftiga skärmetoder. Detta är naturligtvis ett steg framåt, men det ställer också högre krav på företagens kunskap om de olika skärmetoderna för att kunna välja rätt metod. Även om vi begränsar oss till den termiska skärmetoden plasmaskärning finns otaligt många begrepp såsom finstråleplasmaskärning, dual-flow, vatteninjektionsplasma, roterande gasflöde och undervattensplasma. Vi har därför valt att utreda detta med ambitionen att ge en uttömmande beskrivning av plasmaskärning; hur metoden fungerar, vilket dess användningsområde är, vilka begränsningar, problem och utvecklingsmöjligheter som plasmaskäraren har. Vi vill även jämföra industrins syn på plasmaskärning med vår utredning, för att finna likheter eller skillnader och se om valet av skärmetod grundar sig på rätta antaganden om plasmaskärningsmetoden.

2 Syfte och frågeställningar

Syftet med rapporten är att utförligt beskriva plasmaskärning som skärmetod, samt övergripande utreda företags antaganden vid val av termisk skärmetod. För att främja syftet har följande frågeställningar formulerats och ämnas att i uppsatsen besvaras:

- Hur fungerar en plasmaskärare?
- Vilka är nyckelkomponenterna i en plasmaskärare och hur fungerar dessa?
- Vilka begränsningar och problem har plasmaskärningsmetoden?
- Vilket är det arbetsområde där plasmaskärare är bäst lämpad?
- Vilka parametrar styr valet av skärmetod i industrin, samt stämmer dessa överens med teorin?
- Vilka utvecklingsmöjligheter har plasmaskärningsmetoden?

3 Metod och källkritik

För att få kunskap om plasmaskärningsmetoden inledde vi arbetet med en litteraturstudie samt intervjuer. Litteraturstudien baseras främst på böcker, encyklopedier samt artiklar. För att få tillförlitlig information har de flesta artiklar samlats in från vetenskapliga databaser, där de gått igenom en granskningsprocess. De artiklar som inte införskaffats från vetenskapliga databaser är "Termisk skärning" [1], "Cleaner consumables, cleaner cuts, better production" [2], "Plasma, oxyfuel and laser: Matching metal cutting needs with the right cutting process" [3], "Welding consumables — Shielding gases for arc welding and cutting" [4] och "Plasmaskärning" [5]. Vi har också använt oss av hemsidor vilka inte har gått igenom samma kontroll av korrekthet som böcker, encyklopedier samt artiklar. De artiklar som inte införskaffats via vetenskapliga databaser samt hemsidor har vi därför valt att nyttja med försiktighet och med ett extra kritiskt granskande öga.

Vi har även utfört fyra intervjuer för att få information om plasmaskärning; Kjell-Arne Persson – Swerea KIMAB AB, Philip Marriott – SPT Plasmateknik AB, Bo Williamsson – AGA Gas AB samt Anders Pettersson – Intercut Sverige AB. Vi intervjuade Kjell-Arne Persson i början av arbetet för att få

grundläggande förståelse kring plasmaskärning. För att få svar på mer fördjupade frågor om plasmaskärningsmetoden besökte vi Phillip Marriot på SPT Plasmateknik AB i Lund. Vi ställde frågor till Bo Williamsson via e-post som behandlade de gaser som används vid plasmaskärning. Anders Pettersson intervjuades för att tillhandahålla mer information om de termiska skärmetodernas användningsområden samt ekonomiska perspektiv.

För att få en bild av industrins syn på skärmetoden valde vi att utföra en marknadsundersökning. Vi identifierade 185 företag som använder plasma-, gas- eller laserskärning genom hemsidan www.industritorget.se. Vi drog sedan slutsatser utifrån de svar som erhöles. Sammanställningen kan kritiseras, främst av två anledningar; dels det begränsade antalet svar – 18 stycken, samt dels utformningen av marknadsundersökningen. Marknadsundersökningen bestod av åtta öppna frågor, dvs. utan givna svarsalternativ (se "Bilaga 3 – Marknadsundersökningen"). Anledningen till de öppna frågorna var att vi ansåg det mycket svårt att formulera uttömmande svarsalternativ samt att svaren blev mer nyanserande och djupare. En nackdel kan tänkas vara att vi fick mer tolkningsutrymme samt att kvalitén på svaren var ojämna.

Arbetet fokuserar främst på CNC-styrda plasmaskärmaskiner då vi anser att dessa har störst nytta i industriella tillämpningar. Det finns även handhållna plasmaskärare som bygger på samma grundprincip, dessa kommer dock inte att analyseras i arbetet.

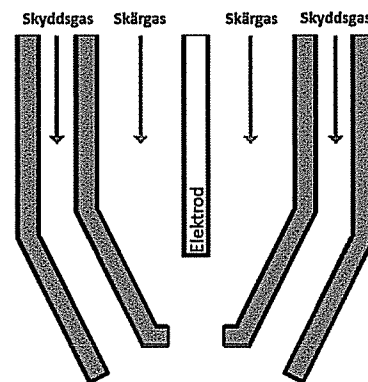
4 Plasmaskärarens historiska utveckling

Under andra världskriget utvecklades en ny svetsmetod kallad TIG-svetsning, som står för Tungsten Inert Gas (den engelska översättningen av svenskans "volfram" är tungsten) [6]. Det är en svetsmetod där en ickesmältande elektrod av volfram genererar en ljusbåge till arbetsstycket. En inert (innebär att gasen är kemisk inaktiv/reaktionströg, mer om det under rubriken "6.1 Skärgasens/plasmagasens funktion") gas omsluter elektroden och svetsfogen för att minimera en reaktion mellan syret i luften och den smälta svetsfogen samt volframelektroden [7]. Den inerta gasen strömmar ut genom ett munstycke där elektroden är centrerad [6]. På 1950-talet bedrevs forskning av företaget Union Carbide för att ytterligare utveckla TIG-svetsen. Deras experiment visade att om öppningen i munstycket minskades, förhöjdes gasens temperatur och hastighet drastiskt [7]. Den inerta gasen värmdes upp till ett plasmatillstånd och den heta strålen hade tillräckligt med energi och temperatur för att skära materialet istället för att svetsa det – plasmaskäraren hade uppfunnits. År 1955 sökte Robert M Gage, Union Carbide's Linde Division, patent på plasmaskäraren [8][9] och år 1957 erhöles patentet vilket medförde att Union Carbide hade monopol på grundutförandet av plasmaskärtekniken i 17 år [7].

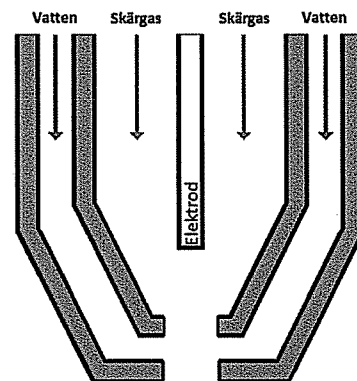
I början av 1960-talet introducerades "dual gas"-plasmaskärare av Thermal Dynamics Corporation. Dual gas innebär att plasmaskäraren har två gaser; en skärgas och en skyddsgas (även kallad sekundärgas, dessa behandlas djupare under rubrikerna "6.1 Skärgasens/plasmagasens funktion" och "6.2 Skyddande medium – gas eller vatten"). Skärgasen leds ned genom en yttre kanal, se Figur 1. Skyddsgasen bidrar till att den skärande plasmastrålen blir mer koncentrerad vilket ökar kvalitén i snittet. Sekundärgasen underlättar också vid genomträngandet av arbetsstycket då metallen ska börja bearbetas [8]. Några år senare började också vatten att användas som skyddande medium [7].

År 1964 började luft att användas som skärgas för kolstål vilket ökade skärhastigheten med upp till 25 % [7] samt bidrog även till en bättre kvalitet på snittet [7][8]. Volfram kunde inte längre användas som elektrodmaterial i den oxiderande miljön och ersattes av zirkonium då luft användes som plasmagas.

Nästa steg i plasmaskärningens historia var vatteninjicerad plasma. Innan hade endast vatten används som en skyddande sköld, men företaget Hypertherm Inc. presenterade år 1968 en teknik där vattnet sprutades in radiellt mot plasmastrålen, se Figur 2. Skärnsnittet blev då ytterligare koncentrerat och metoden blev den ledande tekniken under de efterföljande 20 åren [8].



Figur 1 – Genomsnittsskärning av kanaler för skär- respektive skyddsgas. Figuren fritt från [29].



Figur 2 – Vatteninjektionsplasma. Observera att vattnet leds radiellt mot plasmastrålen. Figuren fritt från [29].

Under 1980-talet slog hafnium igenom som det dominerande elektrodmateriallet då oxiderande gaser (luft och rent syre) användes. Hafniumelektroden håller längre än en motsvarande zirkoniumelektrod [8].

För att minska ljudnivån, rökutveckling samt till viss mån minska HAZ, Heat Affected Zone, presenterades år 1977 en metod där skärprocessen sker under vatten [7]. Denna metod medför dock en del nackdelar. Dessa behandlas under "8 Miljöpåverkan – utsläpp och säkerhetsrisker".

Under 1990-talet förbättrades energitätheten och koncentrationen i plasmastrålen vilket gjorde att finplasmametoden till en viss mån började konkurrera med laserskärning [8].

5 Grundläggande tekniska egenskaper för plasmaskärning

5.1 Översiktlig teknisk beskrivning

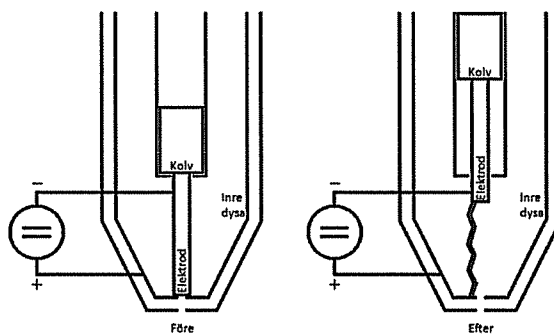
Grundprincipen bygger på att en kontinuerlig elektrisk urladdning, kallad pilotljusbåge, genereras mellan en elektrod och den inre dysan (se rubriken "6.3.4 Inre dysa"). Elektroden är kopplad till en negativ pol och munstycket är kopplad till pluspol. Effekten i denna pilotljusbåge är relativt låg. Ljusbågen förs i sin tur över till arbetsstycket då skäraren närmar sig arbetsstycket. Det är därför ett krav att arbetsstycket är elektriskt ledande och kopplat till jord för att metoden ska fungera. Från kanaler i munstycket leds därefter en skärgas ut, som värms upp av den elektriska ljusbågen till ett plasmatillstånd. Samtidigt ökas den elektriska strömmen i ljusbågen gradvis till att komma upp till den nominella nivån. Den extremt varma plasmastrålen smälter sedan ett skärnitt i arbetsstycket och det smälta materialet blåses bort med hjälp av trycket från skärgasen. För att bl.a. koncentrera plasmastrålen och därmed få ett finare skär kan man tillföra skyddsgas eller vatten till plasmastrålens periferi. Nedan kommer vi mer ingående behandla de olika stegen i skärprocessen samt de komponenter som plasmaskäraren består av.

5.2 Tända pilotljusbågen

Vid start av plasmaskärare måste först en pilotljusbåge tändas. Denna process kan gå till på två olika sätt. Nedan diskuterar vi de två olika processerna och ger en mer ingående förklaring över hur dessa går till. I båda fallen är det vanligt att ren argon används som startgas för att underlätta tändningen [6].

5.2.1 Retract-starting

Retract-starting innebär att elektroden innan start ligger i kontakt med den inre dysan. En ström går då genom elektroden och dysan som en sluten krets. Genom att en kolv som är kopplad till elektroden dras bakåt lämnar elektroden dysan och positionerar sig i sitt arbetsläge. Vid det ögonblicket bildas då pilotljusbågen mellan elektroden och den inre dysan [10], se Figur 3.



Figur 3 – Skiss över hur retract starting fungerar. Bild fritt från [10]

5.2.2 HF generator

Den andra metoden för att tända pilotljusbågen är genom att koppla in en högfrekvensgenerator som genererar en högspänning som får atomerna och elektronerna i gasen mellan elektroden och dysan att vibrera så pass mycket att det blir ett genomslag genom gasen så att pilotljusbågen tänds. Elektroden befinner sig då fixerad i arbetsläget hela tiden vilket gör att denna typ av start blir något lättare konstruktionsmässigt då användning av den rörliga kolven blir överflödigt [10].

5.3 Överföring av pilotljusbågen till arbetsstycket

Efter att pilotljusbågen är genererad mellan elektroden och den inre dysan ska ljusbågen föras över till arbetsstycket. Då gasen når pilotljusbågen värms gasen upp till plasmatilståndet vilket innebär att elektroner frigörs från atomerna [11]. Plasma består således av laddade partiklar; joner samt fria elektroner, vilket gör det möjligt för plasma att leda elektriska strömmar. Den elektriska strömmen leds därför från elektroden, genom plasmagasen, till munstycket. På grund av gasens snabba flöde kommer plasmagasen att blåsas ut från munstycket och om det ledande arbetsstycket är tillräckligt nära placerat kommer ljusbågen att överföras till denna. Lämpligt avstånd, vanligtvis mellan 5-15 mm [8], beror på flera faktorer, t.ex. strömstyrka samt ledningsförmåga i metallen. För de flesta plasmaskärare känner styrsystemet automatiskt av att ljusbågen har förts över till arbetsstycket och kopplar då bort den inre dysan från den elektriska kretsen [8]. Effekten ökas stegvis till den nominella och styrsystemet växlar också eventuellt till skärgas om inte denna även användes som tändningsgas.

5.4 Skärning och dess förfarande

Själva skärprocessen sker genom att den varma plasman sprutas ner med högt tryck mot arbetsstycket. Plasman smälter då arbetsstycket och det höga trycket gör att smältan blåses ut genom skärnittet och bort från verktyget [6].

Det finns två olika sätt för hur plasmaskäraren kan närma sig arbetsstycket. Det ena är att starta rakt ovanför arbetsstycket och det andra är att närma sig arbetsstycket från sidan. Vilken metod som väljs beror på hur geometrin på slutprodukten ska se ut.

Att närma sig arbetsstycket ovanifrån kan medföra att verktyget svetsas fast. Detta beror på att när plasman smälter materialet samtidigt som gstrycket blåser upp smältan från den ännu inte genomsmälta kratern, bildas det vallar av smälta runt genomslagshålet, se "Bilaga 2 – Bilder på olika defekter efter bearbetning med plasmaskärare". Dessa vallar riskerar då att komma i kontakt med munstycket och sedan stelna. Problemet uppkommer främst under bearbetning av tjockare arbetsstycken då det bildas mer smälta innan plasmagasen har smält igenom hela arbetsstycket och avståndet mellan arbetsstycke och plasmaskärare blir då för litet [8]. Det problemet uppkommer inte då plasmaskäraren närmar sig från kanten då smältan blåses iväg över kanten och på så sätt undkommer problemet. När det är möjligt föredras därför att använda den senare metoden. För att komma ifrån problemet kan arbetsstycket förborras där plasmaskäraren sedan ska starta sin process. Det förborrade hålet fungerar då som en kanal som smältan kan försvinna igenom. Detta innebär dock en extra operation som tar tid i produktionen. Problemet kan också minskas genom att vinkla verktyget vid genomträngandet [12], vilket dock kräver ytterligare en styrd axel.

När första kontakten är gjord och själva bearbetningen börjar bör plasmaskäraren hållas på ett avvägt avstånd från arbetsstycket, normalt är skäravståndet 1-6 mm [13]. Detta för att få en jämn kvalitet och bredd på skärnittet samt att undvika att det bildas slagg (smält material) på undersidan av det och för att få en minimerad vinkel på skärytan. Mer om hur arbetsstycket och skärnittet

påverkas av olika faktorer under rubriken "9 Begränsningar och problem". Avståndet för optimal kvalitet varierar beroende på materialets tjocklek samt strömstyrkan. De modernare CNC-styrda plasmaskärarna har ett inbyggt övervakningssystem som övervakar bågspänningen och varierar höjdhållningen för att på så sätt minimera dessa problem [8].

Den skärhastighet en plasmaskärare klarar av beror på en mängd olika faktorer, bl.a. vilken typ av gas som används, gasflödet, vilken strömstyrka som används, vilken typ av maskin som används, hur tjockt materialet som skall bearbetas är samt vilken typ av material det är. I "Bilaga 1 – Tabell över skärhastighet vid olika strömstyrka och tjocklek" presenteras en tabell med skärhastigheter vid olika tjocklekar för att tydligare klargöra när plasmaskärning används och med vilka prestanda den klarar av att bearbeta materialet. Tabellen är från SPT Plasmateknik och för en specifik modell av deras plasmaskärare, Sparcin 4000. Uppgifterna stämmer alltså för denna produkt och ger en fingervisning på typiska värden, vi vill dock understryka att siffrorna kan variera om andra modeller eller fabrikat används.

6 Plasmaskärarens nyckelkomponenter och dess funktioner

6.1 Skärgasens/plasmagasens funktion

Skärgasens uppgift är att tillföra så mycket termisk energi som möjligt, med ett högt tryck så att plasmat för med sig det bortsmälta materialet bort från arbetsstycket, samt genom plasmans fria elektroner leda elektrisk ström. Plasmagasen ska utföra dessa uppgifter med så liten påverkan av arbetsstyckets materialstruktur som möjligt. Det används flera typer av plasmagaser, de vanligaste är argon, helium, nitrogen (rent kväve), oxygen (rent syre), hydrogen (rent väte) och luft. Torr luft består i sin tur utav 78,1 volymprocent kväve, 20,9 volymprocent syre, 0,9 volymprocent argon, 0,04 volymprocent koldioxid [14]. Gaserna blandas ofta för att få önskade egenskaper. Två av de vanligaste standardblandningarna är dels 65 % argon och 35 % hydrogen samt dels 95 % nitrogen och 5 % hydrogen [12]. Faktorer som påverkar valet av plasmagas är enligt [15] entalpi (dvs. gasens tillgängliga energi), kemisk reaktionsförmåga samt kostnad. Enligt [12] är entalpi och kostnad av sekundärt intresse, plasmagasen väljs för att optimera skärnittets metallurgiska och kemiska egenskaper.

6.1.1 Kemisk reaktionsförmåga

De ovan nämnda plasmagaserna kan delas in som inerta, oxiderande eller reducerande gaser [4]. Argon och helium är ädelgaser som har fulla yttersta elektronskal vilket medför att ämnena ogärna reagerar med andra ämnen och är därför inerta, "kemsikt inaktiva", gaser. Nitrogen är inte en ädelgas, men är också reaktionströg och brukar därför kategoriseras som en inert gas [16]. Hydrogen är en reducerande gas, vilket innebär att väteatomerna reagerar med omgivande atmosfärens syre [12]. Gaser som innehåller syre, såsom luft och oxygen är oxiderande gaser.

Vid skärning av metaller med legeringsämnen används oftast inerta eller reducerande gaser för att undvika en reaktion mellan plasmagasen och legeringsämnena. Om t.ex. en oxiderande plasmagas skulle användas på rostfritt stål så kan syret reagera med stålets kromlegering vilket innebär att rostskyddet försämras kring skärnittet. Reaktionen mellan kromet och syret bildar också en hård kromoxid i snittytan som måste tas bort innan snittet ska svetsas [12].

Om nitrogen eller luft (som till 78,1 volymprocent består av nitrogen) är skärgas kan ett tunt nitrogenlager på cirka 20 µm bildas på snittytan. Om snittet sedan ska svetsas kan ytskiktet av nitrogen orsaka porositet i svetsfogen [1]. För att motverka detta problem kan den oxiderande gasen oxygen tillsättas. Oxiderande gaser i sig motverkar inte nitrering, utan det är minskningen av nitrogen som gör skillnaden [16]. I teorin kan också skärhastigheten ökas vid användning av oxiderande gaser eftersom syret kan reagera exotermt (en process där temperaturen stiger, slutprodukten har lägre energi än utgångsämnen [17]) med metallatomerna [18]. Detta gäller främst för låg- eller olegerade stål. Materialet i skärnsnittet smälter samt förbränns då bort, jämfört med andra plasmagaserna då materialet endast smälts bort. Enligt [18] har förbränningen av materialet stor inverkan på skärdjup upp till cirka dubbla ljusbågens diameter (ett fåtal millimeter), vid användning av de oxiderande gaserna luft och oxygen. För djupare skär har den exoterma reaktionen endast en liten påverkan.

Reducerande gaser tillsätts för att motverka oxidering i skärnsnittet. Oxidering i skärnsnittet påverkar främst efterföljande lackering av detaljen negativt. Lacken fäster i oxidskiktet, så om oxidskiktet flagnar kommer också lacken att släppa. Detta gäller framförallt för pulverlackering [16].

6.1.2 Entalpi

Som tidigare nämnts väljs plasmagaserna främst för att minimera påverkan av den kemiska sammansättningen i arbetsstycket. Entalpin dvs. gasens tillgängliga energi vid konstant tryck måste dock också beaktas. Även om t.ex. helt inerta gaser vore att föredra för vissa applikationer, så är inte argon och helium tillräckligt energirika för att effektivt smälta bort material i skärnsnittet [1] [12]. Hydrogen, som har högre entalpi, kan tillsättas för att öka gasens energiinnehåll vilket medför att skärgasen inte längre är helt inert. Standardblandningen 65 % argon och 35 % hydrogen är därför en vanlig gaskombination om inert atmosfär önskas.

6.1.3 Priser på skärgaser

Enligt [12] uppskattas gaskostnaderna till cirka 30 % av driftskostnaderna för en plasmaskärare, men poängterar att siffran kan skifta mycket beroende på konfiguration. I ren gaskostnad är luft billigast i längden eftersom endast en kompressor förser plasmaskäraren med skärgas. Vi kan dock konstatera att val av plasmagas påverkar fler kostnader än bara gaskostnaden eftersom slitdelarnas livslängd i hög grad beror på vilken plasmagas som används. Utslitna delar innebär dels inköpskostnader för nya delar, men kanske främst stilleståndskostnader. Med detta med i beräkningen uppskattar [12] oxygen, luft och nitrogen som de dyraste skärgaserna i fallande ordning.

6.1.4 Vanliga skärgaser för svart stål, rostfritt stål och aluminium

Som vi beskrev under rubriken "6.1.1 Kemisk reaktionsförmåga" kan gaserna blandas efter skärnsnittets metallurgiska samt kemiska egenskaper. Val av skärgas kan alltså variera stort. I Tabell 1 visas de vanligaste använda skärgaserna för några metallsorter.

Metall, tjocklek	Vanligaste skärgaser
Rostfritt stål, < 6 mm	Nitrogen eller nitrogen/hydrogen
Rostfritt stål, > 6 mm	Argon/hydrogen eller nitrogen/hydrogen
Aluminium, < 5 mm	Luft
Aluminium, > 5 mm	Argon/hydrogen eller nitrogen/hydrogen
Kolstål	Oxygen

Tabell 1 – De vanligaste skärgaserna för rostfritt stål, aluminium samt kolstål. Observera att skärgaserna kan skilja sig från tabellen [12] [16].

6.2 Skyddande medium – gas eller vatten

För så kallade "dual flow"-plasmaskärare tillförs en skyddsgas, även kallad sekundärgas, genom en yttre kanal, se Figur 1. Det skyddande mediet har två funktioner, dels att skydda processen från omgivande atmosfär samt dels att koncentrera energitätheten i plasmastrålen [12]. Det skyddande mediet underlättar också det initiala genomträngandet av arbetsstycket genom att blåsa bort de vallar av smält material som bildas [8]. Likt plasmagaser kategoriseras skyddsgaser som inerta, reducerande och oxiderande [4]. Även vatten kan användas som skyddande medium.

6.2.1 Ökar plasmastrålens energitäthet

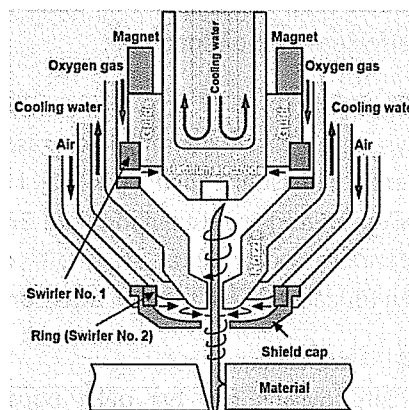
Det är önskvärt att få en smal plasmastråle med hög energitäthet, eftersom det möjliggör smalare skärnitt med mindre vinkelfel [12]. Sekundärgasen koncentrerar och ökar därmed energitätheten i plasmastrålen genom att kyla ned dess periferi eftersom att densiteten ökar vid lägre temperatur [12]. Temperaturen i centrum av plasmastrålen påverkas dock inte nämnvärt av sekundärgasen [12]. Som nämnts ovan kan även vatten användas som omslutande medium vilket kan öka livslängden för dysan tack vare vattnets kylande effekt [7]. Plasmastrålen koncentrerar sig dock inte nämnvärt mer, om inte vattnet injiceras radiellt mot plasmastrålen, så kallad vatteninjektionsplasma [7], se Figur 2. Vatteninjektionsplasma används främst vid skärning av tunna (< 10 mm) plåtar i rostfritt stål [12].

6.2.2 Skyddar plasmastråle, elektrod samt arbetsstycke mot omgivande atmosfär

Då arbetsstycken med rostskydd ska bearbetas används inert skärgas och volframelektrod. Det är då viktigt att tränga bort omgivande luft eftersom det är ej önskvärt att syret varken reagerar med volframelektroden eller med arbetsstycket. Därför används ofta en blandning mellan den reducerande gasen hydrogen och den reaktionströga gasen nitrogen som skyddsgas [12]. Hydrogenet reducerar bort luftens syre och nitrogenet fungerar som en omslutande vägg runt plasmastålen, elektroden och det varma skärnittet.

6.3 Munstycket och dess funktion

Munstycket på plasmaskäraren har som främsta uppgift att koncentrera plasmagasen så mycket som möjligt för att på så sätt få ett finare skärnitt. Då munstycket är utsatt för mycket höga temperaturer under skärning är de flesta komponenterna vattenkylda då de annars skulle smälta. Olika typer av munstycken är anpassade för bearbetning av olika tjocklekar på arbetsstycket vilket gör att dessa måste bytas ut då produktionen ställer om från en tjocklek till en annan. En typ av munstycke har vanligtvis ett bearbetningsintervall runt 10 mm [19]. Munstycket är uppdelat i ett antal olika komponenter, se Figur 4 och Figur 5, som nedan kommer att diskuteras mer ingående.



Figur 4 - Munstycke i genomskärning, bild från (49)



Figur 5 - Plasmaskärarens olika komponenter; 1 skyddskåpa, 2 munstyckets bas, 3 yttre dysa, 4 sköld, 5 swirl ring, 6 inre dysa, 7 elektrod

6.3.1 Munstyckets bas

Denna komponent innehåller rör och ledningar för tillförsel av kylvatten, skärgas och skyddsgas samt gängor/fästansordningar för att kunna fästa de övriga komponenterna.

6.3.2 Swirl ring

Vissa modeller har en ring med snedställda spår i, precis nedanför gasinsläppet, vars funktion är att rotera skärgasen och ibland även skyddsgasen (se nummer 5 i Figur 5). Denna är vanligtvis i keram men kan även vara gjord i ett kompositmaterial eller vulkanlava [2]. Genom att gasen roteras ökar energitätheten vilket ger förbättrade skäregenskaper [1]. Rotation av gasen ökar även tjockleken på lagret av sval gas mot den inre dysans vägg vilket minskar risken för dubbelbåge (ett oönskat fenomen som diskuteras vidare under rubriken "9 Begränsningar och problem") samt skyddar dysan från att smälta av den heta plasmagasen [2]. Genom att inte rotera gasen minskas koncentrationen något men den är då verksam på längre avstånd vilket lämpar sig bättre då tjockare material skall bearbetas [15]. Anledningen till detta är att skärgasens hastighet i vertikalled minskar vid rotation och effekten avtar då snabbare.

6.3.3 Dysa

En dysa är en kapsel genom vilken gaser flödar. Designen på dysan påverkar hur gasen rör sig med avseende på hastighet och tryck [20]. I plasmaskärare används antingen en eller två dysor beroende på vilken metod man använder. De är ofta gjorda i koppar vilket gör att de är känsliga för höga temperaturer och riskerar att smälta om någon del i munstycket inte fungerar som den ska [2]. Nedan förklaras de två typerna av dysor samt deras funktioner.

6.3.4 Inre dysa

Den inre dysans har två olika uppgifter. Dels att agera som pluspol under tändningen av pilotljusbågen och dels att öka skärgasens hastighet. Designen på den inre dysan är anpassad efter olika motsatser, en lång och smal dysa ger en snabb, varm och kompakt plasmastråle. Dock ökar då risken för dubbelbåge och dysan blir i högre utsträckning negativt påverkad av värmen vilket minskar dess livslängd [21]. Detta gör att dysans design får anpassas till att ge så goda egenskaper som möjligt utan att öka risken för dessa problem allt för mycket.

6.3.5 Yttre dysa

Beroende på typ av munstycke kan det finnas en yttre dysa. Denna är inte nödvändig för själva funktionaliteten utan används för att ytterligare koncentrera skärgasen och minska skärsnittets bredd och öka finheten i skäret genom att en skyddsgas eller vatten omsluter skärgasen [8]. Skyddsgasen kan roteras om det är önskvärt att koncentrera skärgasen ännu mer (se No.2 i Figur 4). Detta gör dock att skyddsgasens effekt inte blir lika effektiv på längre avstånd från munstycket som om gasen inte roteras. Att använda skyddsgas samt att rotera skärgasen ökar alltså skärsnittets kvalitet, minskar plasmastrålens bredd och ökar skärhastigheten då mindre material bearbetas, denna metod kallas för finstråleplasma [1]. Yttre dysan kan vara formad så att det skyddande mediet injiceras radiellt eller mer axiellt mot skärgasen. Axiellt ger en förlängd koncentrerande effekt medan radiellt ger en högre koncentration av plasmastrålen, men då på ett kortare avstånd.

6.3.6 Sköld

Skölden monteras längst ner på ytterhöljet. Dess funktion är att skydda övriga komponenter från slagg, gnistor och andra partiklar som riskerar att komma in i munstycket och förstöra komponenter. Den skyddar även den inre dysan från dubbelbåge från arbetsstycket [2].

6.3.7 Magnet

I munstycket kan det placeras magneter som även dessa har som uppgift att koncentrera plasmastrålen. Detta sker genom att magnetfältet som genereras påverkar de frigjorda jonerna i plasmastrålen och pressar ihop dessa [15]. Metoden är dock inte särskilt välutvecklad och tillämpas sällan praktiskt i dagsläget [12].

6.4 Elektroden och dess funktion

6.4.1 Materialval

Syftet med elektroden är att kontinuerligt förse elektroner till ljusbågen, som sedan värmer upp skärgasen till ett plasmatillstånd [15]. För att elektroden på bästa sätt ska uppfylla denna funktion är det önskvärt att elektroden är tillverkad av ett material med följande egenskaper [6]:

- Låg elektrisk resistivitet
- Hög smälttemperatur
- God värmeledningsförmåga (termisk konduktivitet)
- Förmåga att lätt emittera elektroner
- Beständighet mot erosion

Volfram, hafnium och zirkonium är tre metaller som uppfyller de fyra första kraven, om än olika väl, och är även beständiga mot erosion i vissa miljöer. Som kan avläsas ur Tabell 2 uppfyller volfram de tre första kraven allra bäst. Vid användning av inerta eller reducerande gaser, som tidigare behandlades, uppfyller materialet även den femte punkten och är därför förstahandsvalet vid inerta miljöer. Om oxiderande gaser används eroderar dock volfram katastrofalt [8]. Vid oxiderande miljöer kan elektroder av zirkonium eller hafnium istället nyttjas. Elektroden pressas fast i koppar- eller silverhållare [12] för att förbättra ledningsförmågan av elektricitet och värme [22]. Idag är hafniumelektroder vanligare än zirkoniumelektroder vid inerta skärgaser [12]. Vidare diskussion om de fem egenskaperna följer nedan.

Metall	Elektrisk resistivitet (vid 20°C)	Smältpunkt	Termisk konduktivitet
Volfram	$5,65 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$	3 407 °C	174 W/m K (vid 27°C)
Hafnium	$5,1 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$	2 227 °C	23,0 W/m K (vid 28°C)
Zirkonium	$42,1 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$	1 852 °C	22,7 W/m K (vid 27°C)

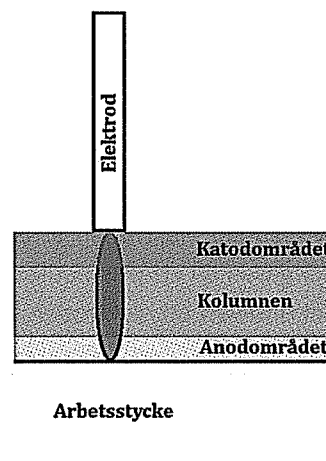
Tabell 2 – Egenskaper hos tre metaller som används som elektroder för plasmaskärare. (Som jämförelse för elektrisk resistivitet kan nämnas koppar som har $1,6730 \cdot 10^{-8}$ ohm m vid 20°C) [23][24][25]

6.4.2 Låg termisk resistivitet – förmåga att leda elektrisk ström

Elektrodens uppgift är att förse ljusbågen med elektroner. Materialet som elektroden är uppbyggd av måste därför kunna leda de stora elektriska strömmar som plasmaskärningsmetoden kräver. Både volfram och hafnium är goda ledare av elektrisk ström. Som vi ser av Tabell 2 är zirkonium en sämre ledare vilket kan påverka framförallt tändningen av plasmaskäraren [22]. Enligt [22] kan detta problem minimeras genom att sammanfoga zirkoniumelektroden med kopparhållaren genom diffusionsbindning istället för den traditionella metoden då kopparhållaren endast pressas på zirkoniumelektroden. Diffusionsbindning är en metod där två ytor pressas samman med tryck och förhöjd temperatur under en längre tidsperiod [26]. Om diffusionsbindning utförs istället för att endast pressa på kopparkroppen, får zirkoniumelektroden bättre kontaktyta och leder därav både ström och värme bättre.

6.4.3 Termisk emission – då elektronerna kan lämna elektroden

Eftersom att elektroden är inkopplad till en elektrisk minuspol transporteras elektroner i elektroden. På grund av potentialskillnaden mellan elektroden (katoden) och arbetsstycket (anoden) kommer elektronerna i katoden sträva efter att nå anoden. För att detta ska vara möjligt måste elektroden hettas upp till en temperatur då termisk emission är möjligt. Termisk emission innebär att ett fast material har en så hög temperatur att elektroner kan utsändas, om potentialskillnaden mellan elektrod och arbetsstycke är tillräckligt stor. Vid denna temperatur har elektronerna tillräckligt med energi för att lämna elektroden [27]. Elektronerna accelereras upp i området närmast elektroden, kallat katodområdet i Figur 6, och kolliderar med skärgasens atomer, som därav får större energi och värms upp till plasmatillstånd där gasatomernas elektroner blir fria. De fria elektronerna kolliderar i sin tur med andra gasatomer och en kedjereaktion bildas.



Figur 6 – Plasmastrålen indelad i tre zoner

Temperaturen för att uppnå termisk emission varierar beroende på vilken metall som används. Hafnium och zirkonium bildar ett oxidlager på elektroden som är isolerande i ett stort temperaturintervall. För att oxidskiktet ska bli ledande måste temperaturen närma sig oxidernas smälttemperatur [15]. Eftersom zirkonium och hafnium har en relativt låg smälttemperatur krävs det dock att det inte blir för varmt. Dessa metaller är därav mer känsliga för temperaturskillnader i katodområdet; om det är för kallt så emitteras inte tillräckligt med elektroner och om det är för varmt smälter elektroderna. För att underlätta termisk emission tillsätts ämnet thorium till volframelektroder [5].

6.4.4 Hög smälttemperatur samt god värmeledningsförmåga

Tillsammans med dysan är elektroden den komponent som är mest utsatt för höga temperaturer [28]. För att elektroden inte ska smälta krävs det således att materialet som elektroden är gjord av har hög smälttemperatur. Plasmastrålen kan delas in i tre områden; katodområdet, kolumnen och anodområdet [10], se Figur 6. Katodområdet är närmast elektroden, och det måste vara tillräckligt varmt för att termisk emission ska vara möjlig, men området ska inte överstiga elektrodens smälttemperatur. Elektroden är därför kyld. För de flesta större ($> 100\text{ A}$) och automatiserade plasmautrustningar är elektroden vätskekyld. För mindre och handhållna plasmaskärare är elektroden gaskyld [2]. Oavsett kylningsmedium leds det ner i en kanal i elektrodhållaren, se Figur 4. Elektrodens goda värmeledningsförmåga bidrar också till att inte metallen smälter genom att värmen snabbt sprids ut över hela elektroden samt hållaren. Ytterligare en bidragande orsak till att katodområdet inte kommer upp till elektrodens smälttemperatur, är att kall skärgas flödar ned runt elektroden och kyler denna [10].

6.4.5 Beständighet mot erosion – beror på materialval och omgivande atmosfär

Volfram har de bästa egenskaperna vad gäller elektrisk resistivitet, smälttemperatur, värmeledningsförmåga samt god förmåga att emittera elektroner då thorium tillsätts. Dess beständighet mot erosion är också god vid användning av inerta eller reducerande gaser och är därför förstahandsvalet då atmosfären är inert eller reducerande. Om en oxiderande gas används måste dock elektroden vara gjord av hafnium eller zirkonium. Dessa metaller bildar ett oxidskikt som skyddar elektroden mot erosion och kan därför användas i en oxiderande atmosfär [1]. Erosionen för zirkonium- och hafniumelektroder i oxiderande gaser är dock större än för volframelektroder i en inert miljö. Störst är erosionen för zirkonium; en hafniumelektrod håller cirka 1,5 gånger längre än en zirkoniumelektrod [8]. Erosionen ökar med högre gastryck samt strömstyrka vilket medför att det begränsar plasmaskärningens utveckling [8], vilket vidare behandlas under "9 Begränsningar och problem".

6.5 Övrig utrustning

6.5.1 Högfrekvensgenerator

Som nämndes under rubriken "5.2 Tända pilotljusbågen" är HF-generatorns uppgift att generera en högfrekvent gnista mellan elektroden och munstycket. Det alstrade genomslagets frekvens kan uppgå till flera megahertz samt spänningar på åtskilliga kilovolt [6].

6.5.2 Strömkälla

Strömkällan har en likströms- och konstantströmsinställning [6][29]. Dess tomgångsspänning ligger omkring 200 V och har en arbetsspänning på över 100 V [6]. Det är strömkällans utgående ström som bestämmer skärhastighet samt hur tjocka material som kan skäras [29]. För att minimera skadan som startgasen kan åsamka munstycket är strömstyrkan därför relativt låg vid start [8]. Både arbetsstycket och dysan är kopplade till strömkällans pluspol.

6.5.3 Skärbord och montering

Skärbordet ser olika ut beroende på plasmaskärarens utformning. Ofta är verktyget monterad på en kartetisk robot som utför den relativa rörelsen mellan verktyg och arbetsstycke. Antal axlar kan då variera från tre till fem, där det senare möjliggör bland annat fasning [12]. Plasmaskäraren kan även monteras på andra robottyper med fler antal axlar. Det finns skärbord som kan utrustas med flera verktyg av olika slag, vilka kan skära parallellt för högre kapacitet. Skärbordet kan ha funktioner

såsom ventilation, automatisk slaggtransport samt vattenkar. Under våren 2010 presenterade företaget Kjellbergs en verktygsväxlare till plasmaskärare som används för att automatiskt byta ut munstycket då olika material skall bearbetas eller efter en viss bearbetningstid för att undvika haveri [19].

6.5.4 Styrsystem

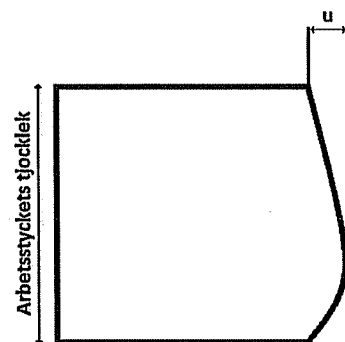
Styrenhetens roll beror på hur avancerat plasmaskärsystemet är. För avancerade CNC-maskiner och industrirobotar ger styrsystemet order om rörelse samt återkopplar och jämför om ordergivet värde stämmer överrens med uppmätt positionsvärde. De avancerade plasmaskärningsutrustningarna innehåller också en höjdhållningsfunktion i styrsystemet för att säkerställa kvalitén i skärsnittet. Höjdhållningssystemet övervakar spänningen och vid variation i spänningen justeras avståndet mellan verktyg och arbetsstycke [8]. Om HF-generator används kopplar styrsystemet ur denna då pilotljusbågen har fått kontakt med arbetsstycket [6]. Styrutrustningen byter då också ofta från startgas till skärgas och styr även gasflödet automatiskt för att minimera erosion.

7 Kvalité på skärsnittet

Vid bearbetning med plasmaskärning uppkommer en del problem och begränsningar som har en negativ effekt på arbetsstycket och i vissa fall krävs efterföljande operationer för att arbetsstycket skall kunna användas. Exempel på sådana begränsningar är att materialet måste vara ledande för att det skall kunna bearbetas med överförd ljusbåge. HAZ, vinkelfel och slaggbildning påverkar också användningsområdet för metoden samt inverkar på skärsnittets kvalitet. Vad dessa innebär och vilka begränsningar detta medför behandlas under rubriken "9 Begränsningar och problem".

Eftersom kvalitén i skärsnittet beror på många parametrar (såsom plasmaskärarens modell, arbetsstyckets material, typ av skärgas, typ av skyddande medium, strömstyrka, spänning, skärhastighet osv.) är det svårt att generalisera vilka toleranser i skärsnittet som en plasmaskärare kan prestera. Vi kan dock konstatera att om rätt konfigurerad, kan finplasmastrålutrustningar åstadkomma ojämnhetsintervall (u i Figur 7) som väl klarar klass två för ISO 9013 vilket motsvarar laserkvalité [30]. ISO 9013 är en internationell klassificeringsstandard för termiskt skurna bitar [31], klass två innebär att måttet u i Figur 7 ska vara under $241\ \mu\text{m}$ [30]. Artikelförfattarna till [30] använde sig av en 200A plasmaskärare och syften som skärgas för att skära en 15 mm tjock plåt av kolstål och jämförde tillverkarens rekommenderade inställningar med deras

egna optimerade konfiguration. Resultatet var att det går att uppnå toleranser som konkurrerar med laserskärning, men det är svårt och parametrar måste omsorgsfullt justeras. Även andra studier har visat att skärmetoden kan uppnå klass två [32]. Enligt [12] är det omöjligt som tillverkare att ge optimal konfiguration för alla kunder. De rekommenderade skärparametrarna stämmer till cirka 90 %, eftersom arbetsstycken med samma materialbeteckning kan skilja sig lite beroende på leverantör av arbetsstycket. Det kan till och med skilja sig för olika partier från samma företag [12]. Kvalitén på skärsnittet beror därför mycket på operatörens erfarenhet och kunskap.



Figur 7 – toleransmått u för ISO 9013. Skärriktning i djupled ("in i pappret")

8 Miljöpåverkan – utsläpp och säkerhetsrisker

Under bearbetning med plasmaskärning förekommer en del rök-, ljud-, ljus- och strålningsutveckling. Dessa faktorer måste beaktas och försiktighetsåtgärder bör vidtagas för att operatörens säkerhet ska vara god och möta de krav som ställs av Arbetsmiljöverket.

Rökutvecklingen under bearbetning med plasmaskärning kan vara kraftig. Mängden rök och innehållet i röken varierar beroende på vilken typ av gas, skyddsgas och material som används för stunden. Exempel på partiklar och gaser som kan finnas i den bildade röken är: metallpartiklar, ozon [33], nitrösa gaser [1].

Ozon är en explosiv gas som även i små mängder kan vara giftig [34], vid inandning kan lungornas funktion påverkas samt hosta, bröstsmärtor och andfåddhet kan framkallas [35]. Vid inandning av nitrösa gaser kan svårigheter att andas upplevas samt att lungödem utvecklas (dvs. att vatten samlas i lungorna) vilket kan vara livshotande [36]. Därför bör det finnas goda ventilationsmöjligheter i rummet där plasmaskäraren är installerad för att säkerställa operatörens hälsa.

Ljudnivåerna från bearbetningen beror på vilken typ av maskin som används och vilken typ av material som bearbetas samt med vilken strömstyrka bearbetningen sker med. Tomgångskörning av en maskin avger ljudnivåer på 50-60 dB på en halv meters avstånd från källan [13] vilket enligt Arbetsmiljöverket är nivån på dagligt tal på en meters avstånd [37]. Denna ljudnivå är alltså ofarlig och kräver inga speciella åtgärder. När bearbetning med höga strömstyrkor sker kan dock ljudnivån öka till strax över 100 dB [1], vilket Arbetsmiljöverket klassar som farligt och att det finns risk för att utveckla hörselskador [37]. Vidare enligt Arbetsmiljöverkets författningssamling om buller, 3 §, skall åtgärder vidtas vid bullernivåer över 85 dB vilket medför att hörselskydd är ett krav för personer som vistas i närheten av en plasmaskärare [38].

Plasmaskärningen utstrålar dels mycket starkt ljus och dels infrarött och ultraviolett ljus. Det ultravioletta ljuset kan ge upphov till synskador och cancer, infraröd strålning kan orsaka skador på hornhinnans vävnader och brännskador på oskyddad hud [39]. För att skydda sig mot denna typ av strålning bör operatören ha skydd för ögonen som är anpassade för att filtrera bort strålningen samt kläder som täcker huden.

Under bearbetning har som tidigare nämnts ljusbågen mycket höga temperaturer som sprider sig till arbetsstycket. Gnistor från skärsnittet förekommer också vilket kan skada operatören och riskerar att antända material i närheten av arbetsplatsen [12]. För att skydda sig mot dessa faktorer bör flamsäkra skyddskläder användas samt skyddshandskar då arbetsstycket eller plasmaskäraren berörs [13].

För att minska påverkan av ovan nämnda faktorer har diverse metoder utvecklats. Det som bäst minskar utsläppen är att genomföra skärningen i vattenbad, så kallad undervattensplasma, eller med extern vattentillförsel mot skärsnittet. Genom att sänka ned arbetsstycket och munstycket i vatten minskas rökutvecklingen till en hundradel [1] och även ljudutsläppen sjunker drastiskt. Denna metod är dock kostsam då energiåtgången blir dubbelt så stor jämfört med att skära ovanför vatten [12]. Ytterligare nackdelar med att skärningen genomförs under vatten är att skärhastigheten sänks med 10-20 % samt att operatören får minskad kontroll över processen då ljudet dämpas och det blir svårare att se skäret [7]. Forskare försöker även utveckla behållare i olika former för att fånga upp

utsläppen när dessa är i gasform då detta kräver mindre energi än om dessa hinner omvandlas till fast form [33].

9 Begränsningar och problem

Metoden har en del begränsningar och problem. De vi har identifierat kommer nedan att förklaras mer ingående för att visa på de brister och fel som kan uppkomma då plasmaskärning används.

9.1 Elektriskt ledande material

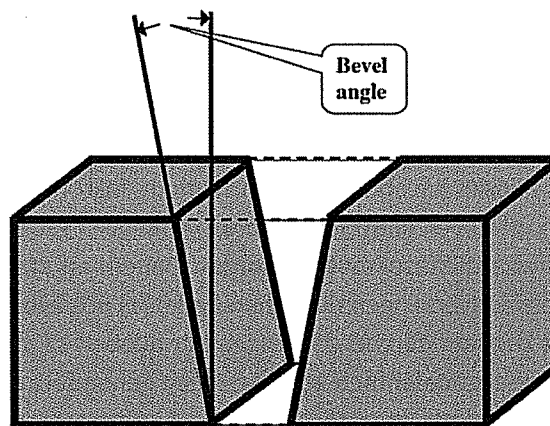
Då plasmaskärning går ut på att en elektrisk ljusbåge genereras från elektroden till arbetsstycket innebär detta att arbetsstycket måste vara elektriskt ledande för att metoden ska fungera [40]. Metoden kan i teorin användas utan en överförd ljusbåge, vilken istället då är kopplad till dysan under processen. För att dysan då ska klara de högre strömmarna skulle denna dock behöva vara mycket större och skärningen skulle bli mycket opraktisk för industriella sammanhang, vilket gör att denna typ av process i dagsläget befinner sig på försöksstadiet [12]. Detta ger plasmaskärningen ett kraftigt begränsat arbetsområde.

9.2 Heat Affected Zone

Då plasman som används för att bearbeta arbetsstycket kan komma upp till temperaturer runt 25 000 K [18] i kolumnområdet och temperaturer över smälttemperaturen i anodområdet [10] bildas oundvikligen en HAZ vilket kan medföra att arbetsstyckets materialegenskaper förändras. Materialet blir förhårdnat och sprött genom korntillväxt och martensitbildning [41]. Problemet med HAZ är större för tunnare arbetsstycken då dessa riskerar att slå sig om temperaturen sprider sig allt för mycket i materialet. HAZ för plasmaskärning är storleksmässigt mellan gas- och laserskärning. Problemet minskar något för plasmaskärning då finstråleplasmametoden används eftersom att plasmastrålen är mer koncentrerad och mindre material påverkas av värmen. För att ytterligare minska HAZ för plasmaskärning kan arbetsstycket sänkas ner i vattenbad (undervattensplasma), munstycket kan ha vatteninjektion eller att vatten tillförs mot skäret från annat håll [1]. Att sänka ner arbetsstycket i vatten påverkar även andra faktorer, se rubriken "8 Miljöpåverkan – utsläpp och säkerhetsrisker". Begränsningen med HAZ medför att laserskärning föredras då tunnare material skall bearbetas då denna metod ger mindre HAZ.

9.3 Vinkel på skäret

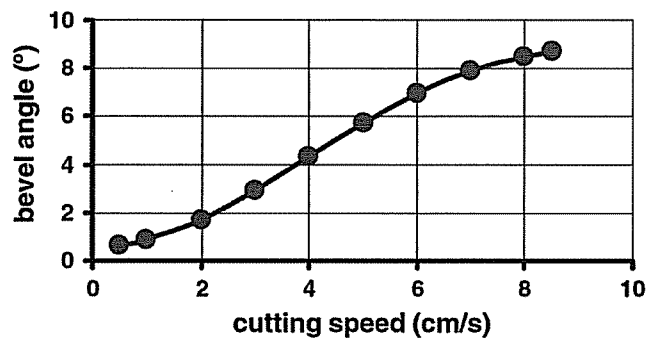
Vid plasmaskärning bildas ett vinkelfel, på engelska kallad bevel angle, längsmed skärnittet, se Figur 8. Vinkeln innebär problem om arbetsstycket ska svetsas fast eller anpassas till någon annan del senare i produktionen. Felet blir större på den ena sidan när gasen roteras, vilket beror på att plasman skiftar i temperatur beroende på var den kommit i kontakt med arbetsstycket [8]. Detta leder till en del programmeringssvårigheter då sidan med det mindre vinkelfelet är den som önskas användas vidare i produktionen medan det



Figur 8 – Vinkelfel, bild från [42]

är mindre viktigt hur restbitens yta ser ut, något som operatören därför måste ha koll på för att se till så att skärningen sker åt rätt håll [1]. I modernare plasmaskärmaskiner är detta problem avhjälpt då operatören endast behöver tala om för maskinen vilken del som skall användas så räknar programmet själv ut från vilket håll operationen skall genomföras för att det mindre vinkelfelet ska hamna på rätt sida [12]. Felet kategoriseras som antingen positivt eller negativt vinkelfel. Positivt innebär att det blir ett V-format skär och negativt innebär det motsatta, att mer material försvinner från skärets undersida [13].

Vinkeln blir större vid höga skärhastigheter, se Figur 9, av flera kombinerade anledningar. Vid högre skärhastighet hinner inte hela arbetsstycket värmas upp utan den övre delen smälter bredare än längre ner i skärnittet. Det smälta materialet ovanifrån hinner inte heller i samma utsträckning blåsas bort av plasmagasen utan lagret med smälta blir tjockare längre ner i arbetsstycket. Smältans termiska resistans gör att



Figur 9 – Vinkelfel vid olika skärhastigheter, bild från [42]

temperaturpåverkan från plasmagasen försvagas ytterligare och skärspåret blir

smalare i botten [42]. Om vinkelfel inte kan tillåtas i produktionen på grund av efterföljande operationer begränsar detta plasmaskärarens användningsområde. Vinkelfelet nästintill obefintligt för gas- och laserskärare [19] vilket medför att dessa metoder föredras då sådana krav ställs.

9.4 Slagg

I förlängningen av ett allt för stort positivt vinkelfel blir öppningen i botten av skärspåret för smal och ytspänningen för det smälta materialet ökar, vilket försvårar för smältan att släppa från skärspåret. Denna smälta riskerar då att stelna och bilda restprodukter på undersidan av skäret, dessa restprodukter kallas slagg [8], se "Bilaga 2 – Bilder på olika defekter efter bearbetning med plasmaskärare". Detta är ett stort problem då det kraftigt försämrar finheten av arbetsstycket och kräver ytterligare en operation där slagget avlägsnas om skärnittet skall fästas mot någon annan del till en slutprodukt.

Förutom ett alltför stort vinkelfel kan slagg bildas av att skärhastigheten är för hög eller för låg [43]. Anledningen till uppkomst av slagg vid olika skärhastigheter är enligt en framstående forskare inom plasmaskärningsområdet ännu inte helt förklarad [8], men den forskning han har genomfört inom området ger följande förklaring till fenomenet: Vid låga skärhastigheter ökar ytspänningen i botten på skärnittet vilket gör att mer smälta kan hållas kvar som sedan stelnar. Vid höga hastigheter är förklaringen att slagget lämnar skärnittet nästan vertikalt beroende på eftersläpning. Med det menas att skärnittet är längre fram högst upp i arbetsstycket och släpar efter i nederkanten vilket medför att smältan från toppen inte avlägsnas från skärnittet vertikalt, utan i en riktning bakåt vilket gör att slagget skjuts bakåt och fastnar på undersidan av arbetsstycket [8].

Ytterligare faktorer som påverkar förekomsten av slagg är vilken skärgas som används och arbetsstyckets tjocklek. Skärgasen påverkar ytspänningen genom kemiska reaktioner med det bearbetade materialet och gaser som sänker ytspänningen är att föredra då slagget lättare lämnar arbetsstycket under sådana förhållanden [44]. Tjockleken gör att trycket från plasmastrålen inte är lika kraftigt vid botten av arbetsstycket och inte räcker till för att blåsa iväg smältan [12].

Dessa parametrar måste därför beaktas vid plasmaskärning vilket lämnar ett hastighetsintervall i vilket skärspåret blir fritt från slag. Även om dessa parametrar är beaktade så är slag beroende på arbetsstyckets sammansättning vilket gör att vissa delar av skäret kan vara fritt från slag medan andra har det beroende på att sammansättningen kan förändras i arbetsstycket [12].

Slagg förekommer även på ovansidan av arbetsstycket vid genomslag i tjockare material mitt på detta då smältan inte har någonstans att ta vägen, se "Bilaga 2 – Bilder på olika defekter efter bearbetning med plasmaskärare" [12].

9.5 Dubbelbåge

Dubbelbåge eller som det på engelska kallas, double-arcing, innebär att den elektriskt ledande bågen som under normal drift går mellan elektroden och arbetsstycket istället går till den inre dysan först och därifrån till arbetsstycket [12]. Fenomenet orsakar skador på dysan och ofta även på elektroden vilket leder till att dessa komponenter måste bytas ut [28]. Komponenterna i sig är förhållandevis billiga att byta ut [12]. Dock innebär stilleståndstiden avsevärda kostnader då produktionen stannar av under tiden munstycket svalnar för att ett byte ska vara möjligt.

Uppkomsten av dubbelbåge beror på en mängd faktorer. Lång och smal dysa, hög strömstyrka samt lågt gasflöde ökar risken [21]. Anledningen till detta är att lagret av gas som omger plasmastrålen och avskiljer denna från dysan minskar. När detta lager minskat till en viss nivå möjliggörs ett genomslag mellan elektroden och dysan då det är en hög potentialskillnad mellan dessa [28]. Även skärgas, oönskad turbulens i skärgasen samt en sliten elektrod har en inverkan som ökar sannolikheten för dubbelbåge. Olika skärgaser har olika kemiska egenskaper vilket kan underlätta ett genomslag. Turbulens och en sliten elektrod gör att plasmastrålen kan förskjutas i sidled vilket medför att det skyddande gaslagret minskar åt ett håll och därmed underlättar elektriskt genomslag [28]. Som en följd av detta kan inte dysans diameter bli allt för smal vilket gör att strålen måste ha en viss tjocklek som i sin tur påverkar och begränsar hur smalt skärets bredd kan vara samt den energitäthet som är möjlig att uppnå i plasmastrålen.

9.6 Genomslag och konturproblem

Under rubriken "5.4 Skärning och dess förfarande" presenterades två tekniker för att initialt närma sig arbetsstycket. Under tiden plasmatrålen smälter ett inledande hål i arbetsstycket står verktyget stilla [45]. Genomslaget ovanifrån är en begränsning för plasmaskärningsmetoden eftersom plasmaskärarens maximala håltagningstjocklek är väsentligt tunnare än dess maximala skärtjocklek [45]. T.ex. kan vanligtvis inte en plasmaskärare med kapacitet att skära 50 mm tjockt material inte genomtränga mer än 25 – 30 mm [12]. Till det kommer risken för att verktyget svetsas fast som tidigare behandlades.

Genomslaget är också ett problem för plasmaskärare då det skapar geometriska fel i skäret och för tjocka material bildas även slag på ovansidan av arbetsstycket se "Bilaga 2 – Bilder på olika defekter efter bearbetning med plasmaskärare". Felen visar sig speciellt då cirklar skall skäras. Antingen bildas

en så kallad näsa se "Bilaga 2 – Bilder på olika defekter efter bearbetning med plasmaskärare" men om detta vill undvikas kan operatören välja att programmera plasmaskäraren så att den skär bort näsan, med resultatet att det istället uppträder ett så kallat skärsår, se "Bilaga 2 – Bilder på olika defekter efter bearbetning med plasmaskärare". Detta begränsar plasmaskärarens arbetsområde då kantstart inte alltid är möjlig för vissa mönster och applikationer samt att det kan medföra att en extra operation krävs där slagget avlägsnas eller där näsan slipas bort med mer exakta metoder [12].

9.7 Erosion på elektroden

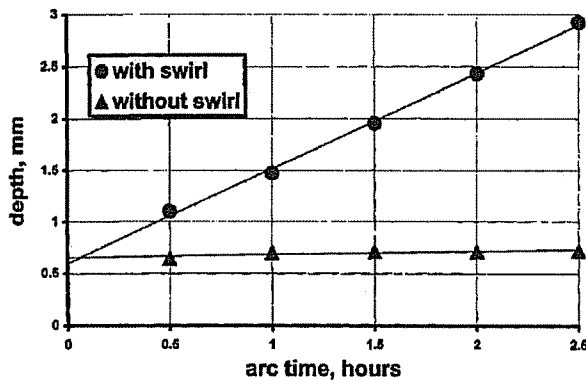
Erosion är då ett material vittras sönder och de bortnötta delarna försvinner från det söndervittrande ämnet. Det finns olika mekanismer som bidrar till den totala erosionen (nettoerosionen) på elektroden, bland annat avdunstning och smältning [46]. Erosion på elektroden har flera negativa effekter. Dels innebär långtgående erosion rent kostnadsmässiga nackdelar såsom att elektroden behöver bytas ut vilket leder till kostnader för stilleståndstid och ny elektrod. Erosion innebär också att geometrin på elektroden förändras vilket leder till att plasmastrålens egenskaper och skärningens kvalitet försämras [47]. Elektroderosion begränsar utvecklingen av att ytterligare öka strömstyrkan samt koncentrationen av plasmastrålen [48]. Enligt [12] är utvecklingen av att öka energitätheten den viktigaste egenskapen för plasmaskäraren i framtiden. Faktorerna kring elektroderosion är dock inte tillfullo förstådda ännu [48] och är därför ett betydelsefullt forskningsområde. Elektroderosionen brukar delas in i två fall; konstantströmserosion samt cyklisk erosion, där den cykliska erosionen ytterligare kan delas in i en start- och en avstängningsfas [47][8][43]. Indelningen beror på att olika fenomen har observerats beroende på vilken fas som plasmaskäraren befinner sig i. Under start- och avstängningsfasen har flera forskare observerat smält elektrodmaterial omkringflygande i brännkammaren. Vid kontinuerlig drift har inte smälta droppar observerats, men resultat visar att elektroden ändå utsätts för erosion. Slutsatsen är att en annan erosionsmekanism råder vid kontinuerlig drift än vid start- och avstängningsfaserna [8].

9.7.1 Erosion vid kontinuerlig drift

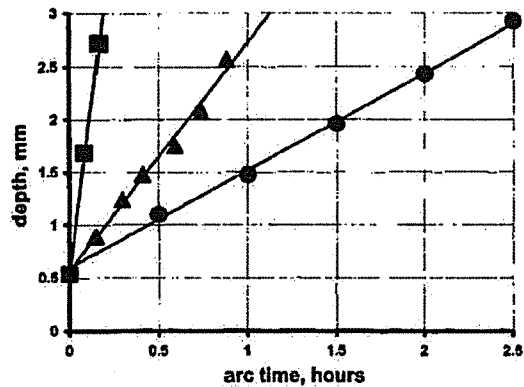
Erosionstakten på elektroden vid kontinuerlig drift beror avdunstning (evaporation) av elektrodmaterial orsakat av flera faktorer såsom strömstyrka, gastryck samt strömningsmönstret av gas i närhet av elektroden [8]. Högre strömstyrka innebär en temperaturökning på elektroden, vilket är anledningen till varför ökad strömstyrka leder till stegrad erosionstakt eftersom avdunstningen sker snabbare vid en högre temperatur [8]. De evaporerade atomerna lämnar elektroden och blir snabbt joniserade. Det finns tre dominerande krafter som påverkar den emitterade jonen; ett elektriskt fält från elektroden, jon-elektronrepulsionen samt en kraft från gasflödet [49]. Nära elektroden är kraften från det elektriska fältet störst, vilken motverkar jonernas acceleration bort från elektroden. Ur erosionssynpunkt är det en önskvärd effekt, eftersom om jonerna återvänder till elektroden, så kommer nettoerosionen att minskas [49]. Om den emitterade jonen når längre bort från elektroden, där flödet av skärgas är starkt, kommer jonerna att involveras i gasflödet vilket för dem bort från elektroden och möjligheten för jonerna att återvända till elektroden minimeras [49]. Ökat gastryck samt roterande strömningsmönster (se "6.3 Munstycket och dess funktion") leder till att det är större risk för jonerna att dras med i gasflödet vilket ökar nettoerosionen eftersom färre joner kan återvända till elektroden [49]. Detta stämmer väl överrens med experiment, se Figur 10 nedan.

9.7.2 Cyklisk erosion

Det har länge varit känt att antalet på och avstängningar påverkar elektrodens livslängd, vilket vi kan se i Figur 11. Cyklisk erosion är störst problem för mindre detaljer eftersom dessa kräver fler start och stopp jämfört med bearbetningstid [48]. Enligt [48] är det olika mekanismer som påverkar erosionen vid av- och påslagningar eftersom de smälta dropparna var större vid avstängningen av plasmaskäraren. Det är dock inte fastställt exakt hur dessa mekanismer fungerar [48].



Figur 10 – Erosionstakt för en hafniumelektrod i en 400 A plasmaskärare med samma gas och gastryck. Erosionen mäts i kraterdjup (mm). (Swirl betyder virvel/rotation)[49]



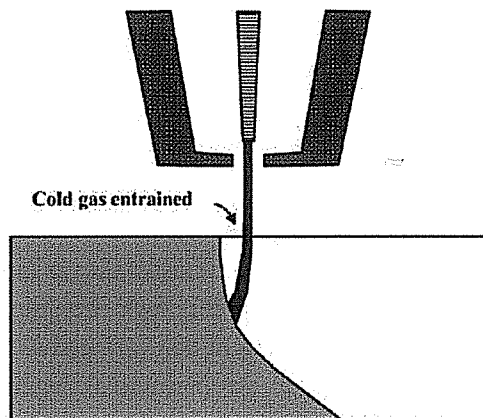
Figur 11 – Visar hur av- och påslagning påverkar erosionstakten (kraterdjupet). För □ slogs plasmaskäraren av och på var 4:e sekund, för Δ var 30:e och för ○ var plasmaskären på hela tiden. [49]

Starterosion förekommer för främst hafnium- och zirkoniumelektroder i oxiderande atmosfär, men enligt [49] inträffar det även för volframelektroder i inerta miljöer. Det råder dock stor osäkerhet varför erosion sker i samband med att pilotljusbågen startas. En teori presenterad i [48] föreslår att erosionen orsakas då pilotljusbågen avlägsnar ett isolerande oxidskikt på elektroden som skapades under föregående användning. Det är dock osäkert hur processen går till och hur det påverkar elektroderosionen [8]. Oavsett hur starterosion uppstår är det ett faktum att starterosion kan minimeras genom att gradvis öka strömstyrkan [49][46].

I samband med avstängning av ljusbågen eroderar också elektroden. Olika teorier har uppställts som förklaring. Enligt [48] beror avstängningserosionen på att gaspartiklar har blandats med smält elektrodmaterial på elektrodens yta. Då trycket runt elektroden snabbt ändras kommer gaspartiklar att lämna smältan i form av bubblor som för med sig elektrodmaterial. Enligt [46] beror avstängningserosion på en komplex växelverkan mellan den smälta elektrodytan och skärgasflödet kring elektroden. Även om teorierna går isär, har praktiska metoder för att minska avstängningserosion upptäckts. Genom att minska gastrycket successivt blir avstängningserosionen mycket mindre [46].

9.8 Arbetsstyckets tjocklek

Vid skärning av tjocka arbetsstycken kan exempelvis vinkelfelet bli mer märkbart vilket kan medföra att skärmetoden inte ger tillfredställande resultat. Detta beror bland annat på att plasmagasen inte är tillräckligt varm i skärnsnittet. Det kan i sin tur bero på anodens placering på arbetsstycket, se Figur 12 [8]. Om anoden är i kontakt med skärnsnittet för högt upp så kommer inte skärgasen att utveckla tillräckligt med värme för att smälta bort den nedre delen av skärnsnittet.



Figur 12 - Anodens placering på arbetsstycket [8].

Enligt [8] beror anodens placering på två faktorer. Den första är geometriaspekten, att ljusbågen vill minimera sin längd eftersom det är mest energieffektivt. Ljusbågen skulle bli kortast om anoden var lokaliserad högst upp på arbetsstycket. Men det finns alltid ett kallt lager på skärnsnittets yta, främst på grund utav att det strömmar in kall gas samt plasmastrålens kalla ytterzon, se Figur 12 [8]. Detta lager blir varmare och därav mer mottaglig för elektriskt genomslag längre ned i skärnsnittet vilket medför att anoden drar sig längre ned i skärnsnittet än om bara geometriaspekten skulle påverka fenomenet [8]. Enligt [8] lokaliserar sig anoden högre upp vid högre skärhastigheter. Författarna poängterar dock att det inte finns någon uttömmande teori om anodplaceringen på arbetsstycket samt att experimentella resultat är tvetydiga.

10 Plasmaskärarens användningsområde, jämförelse med andra termiska skärmetoder

Tidigare i denna rapport har vi tagit upp för- och nackdelar med plasmaskärning samt dess begränsningar. Även vilka typer av material som är möjliga att bearbeta har berörts. Nedan diskuteras plasmaskärningens användningsområden mer detaljerat och konkret för att ge läsaren en bättre överblick.

10.1 Övergripande ekonomiska aspekter för termisk skärning

En CNC-styrd plasmaskärare för industriella sammanhang kostar i grundutförande omkring 1,2 miljoner kronor. Utöver grundutförandet kan ett flertal komponenter adderas till maskinen vilket höjer priset. Exempelvis kan plasmaskäraren utrustas med märkmaskin, extra styrd axel för fasning, verktygsväxlare och borrarverktyg vilket möjliggör att fler processer kan ske med en uppspanning. Det är även vanligt att en eller flera gasbrännare monteras på samma bearbetningsmaskin. Priset kan då uppkomma till åtskilliga miljoner kronor. Motsvarande laserskärare i grundutförandet kostar runt 3,5 miljoner kronor. Även denna kan utrustas med diverse extrafunktioner vilket då självklart höjer priset. En gasskärare i grundutförande kostar runt 0,7 miljoner kronor men har då betydligt sämre prestanda än ovan nämnda laser- och plasmaskärare [19].

Plasmaskärarens driftskostnader beror på slitdelar, operatörskostnader, energikostnader, gaskostnader samt service och stilleståndstider. Jämfört med laserskärning är driftskostnaderna mindre då laserskärning förbrukar mer gas, har högre servicekostnader samt lägre verkningsgrad. Det

är dock möjligt med högre automatiseringsgrad för laserskärning vilket friställer operatören under längre perioder än för plasmaskärning. Detta beror på att plasmaskärning kräver en mer frekvent kontroll av slitdelar vilket försvårar robothantering och skärnittskvalitet. Dessa faktorer gör att laserskärning kan bli billigare vid hög beläggning och stora serier. Den enda egentliga driftskostnaden för gasskärare är den gas som förbrukas under användning och operatörskostnaden vilket gör denna metod till den billigaste i det avseendet [19].

10.2 Användningsområden

Generellt kan sägas att plasmaskärning är långsammare än laserskärning för tunnare material men snabbare än gasskärning [6]. Även kvalitén på skärnittet för plasmaskärare, den tjocklek som metoden kan bearbeta samt den värmepåverkade zonen (HAZ) som uppkommer är mellan laser- och gasskärare vilket gör att plasmaskärningen användningsområde är mellan det för laser- och gasskärare [6][1].

Självklara användningsområden för plasmaskärning är rostfritt stål, aluminium och koppar då dessa material inte kan bearbetas med gasskärning [6]. Detta beror på att gasskärning är en förbränningsprocess vilket innebär att metallens oxider måste ha lägre smälttemperatur än det rena materialet för att metoden ska fungera, något som dessa ämnen inte har [1]. Laserskärning kan bearbeta dessa material, dock kan problem uppkomma om en koldioxidlaser används (vilken är den vanligaste typen av laser [1]) för aluminium och rostfritt stål då dessa material reflekterar ljuset samt för koppar på grund av dess värmeledningsförmåga, vilket begränsar den tjocklek som kan bearbetas [12]. Plasmaskärning är bäst lämpad för bearbetning i följande material och tjocklekar, vi har valt att presentera dessa siffror i text då en förklaring krävs för att motivera gränserna och anser att en tabell skulle bli för svår att tyda:

Rostfritt stål i ett område mellan 10-180 mm är gynnsamt. Detta beroende på att laserskärning klarar av att bearbeta detta material med god kvalitet upp till 10 mm men börjar efter det att få problem med energiförluster på grund av reflektionen. Vid tjocklekar över 180 mm minskar behovet av termisk skärning vilket gör att det inte har utvecklats metoder för detta [1] [12].

Aluminium har ett gynnsamt intervall för plasmaskärare mellan 6-80 mm. Den undre gränsen beror även här på att laserskärare skär med bättre kvalitet och hastighet upp till denna gräns men efter det blir reflektionsproblemet för stort [1]. Den övre gränsen beror främst på att aluminium sällan bearbetas i tjockare material men metoden får även vissa problem med skärnittskvalitén vid dessa tjocklekar, exempelvis genomslagsproblem samt problem med slagg [19].

För koppar passar plasmaskärning bäst i tunna material upp till 20 mm. Den övre begränsningen beror på att koppar är mycket ovanligt i högre dimensioner än så men [12] uppskattar att en kraftig plasmaskärare har möjlighet att bearbeta koppar i upp till 40-50 mm [12] [19].

Låglegerade och olegerade stål är de material som plasmaskärning har störst konkurrens inom. Detta beror på att laserskärning fungerar utan problem och med god hastighet upp till 20 mm [19]. Även gasskärning fungerar utmärkt för dessa material och har möjlighet att bearbeta mycket tjocka arbetsstycken. Från tjocklekar mellan 15-30 mm minskar även det hastighetsövertag laser- och plasmaskärning har gentemot gasskärning snabbt vilket gör att den övre gränsen för plasmaskärningen minskar [6][1] till runt 50 mm beroende på att både plasma- och gasskärning då

har likvärdiga skärhastigheter samt att plasmaskärningen får problem med skärnittets kvalitet [6][13].

Observera att laserskärning oftast ger bättre kvalitet på skärnittet. Siffrorna ovan är sammanställda med hänsyn tagen till följande aspekter; hastighet, tekniskt möjliga material att bearbeta samt kvalitet på skäret. Vi anser dock att det egentligen inte finns något enkelt sätt att avgöra vilken metod som lämpar sig bäst på förhand utan vi menar att det krävs en avvägning från fall till fall för att säkerställa att användaren och slutkunden blir nöjda med kvalitén. Detta beroende på att alla ovanstående faktorer samt att nyttjandegrad, produktvariation, krav på värmepåverkan, efterföljande bearbetningssteg, användningsområden för detaljen, konditionen på arbetsstycket (rostigt material är svårt att bearbeta för laser [3]) samt många fler faktorer behöver beaktas för att kunna ta ett korrekt beslut.

11 Användning av termiska skärmetoder i industrin

Som en del i arbetet har vi genomfört en marknadsundersökning för att ta reda på vilka faktorer som industrin har valt att beakta vid val av skärmetod, se "Bilaga 3 – Marknadsundersökningen" och "Bilaga 4 – Sammanställning av marknadsundersökningen". Frågorna berörde dels det material som bearbetas, vilka tjocklekar som är vanligast förekommande, efterföljande bearbetningssteg, ytfinhetskrav samt parametrar som styrt valet. Vi skickade ut frågeformuläret till företag som innehar antingen en laser-, plasma- eller gasskärare. De flesta företagen var legotillverkare vilket vi anser är positivt då dessa i sin tur har kunder från många olika industrisegment och på så sätt speglar en stor del av marknadens skärbehov. Nedan presenteras de slutsatser vi har observerat utifrån undersökningen. Vi vill här påminna om bristerna i marknadsundersökningen som vi tog upp under rubriken "3 Metod och källkritik" då vi endast erhöll 18 svar av 185 tillfrågade.

11.1 Företag med laserskärare

De flesta av dessa företag bearbetar rostfritt stål, aluminium samt enstaka som även bearbetar svart stål (kolstål), förzinkad plåt, mässing, konstruktionsstål och koppar. Några av dessa material kan, som vi diskuterade under rubriken "10 Plasmaskärarens användningsområde, jämförelse med andra termiska skärmetoder", vara problematiska för laserskäraren beroende på tjockleken av arbetsstycket. Vi kan också konstatera att företagen inte utnyttjar laserskärarens fulla kapacitet då de endast bearbetar elektriskt ledande material. Företaget L-B bearbetar exempelvis rostfritt i tjocklekar mellan 10-12 mm och kolstål under 15 mm. Det är omkring detta område som plasmaskärning kan vara att föredra för att bearbeta effektivt. Utöver det tillkommer att företaget inte har någon kunskap om plasmametoden och dess egenskaper. De andra företagen har koncentrerat sin bearbetning på tunnare och medeltjocka material (från 0,5-20 mm). Då vi inte har fått någon information vad gäller fördelningen av bearbetat material i intervallet är det svårt att dra några slutsatser. Men om de flesta kunderna bearbetar medeltjockt material (10-20 mm) skulle bearbetning med plasmaskärning föredras då en högre skärhastighet går att uppnå [6]. De skulle även kunna utöka sin kundbas då tjockare material skulle vara möjligt att skära samtidigt som tunnare material fortfarande kan bearbetas. Den sämre kvalitén i skärnittet skulle inte påverka produktionstakten nämnvärt eftersom att samtliga företag har svarat att de redan i dagsläget antingen slipar eller gradar produkten efter skärbearbetningen.

Anledningarna företagen har uppgivit för att motivera valet av skärmetod går isär med den teori vi tidigare har diskuterat i arbetet. Fyra av nio av de tillfrågade företagen har uppgett pris som en av anledningarna till metodvalet, något som vi finner förvånande då en laserskärare kostar från det dubbla och uppåt mot för vad en plasmaskärare med motsvarande kapacitet kostar [12]. Förutsatt en hög beläggingsgrad och stora serier är laserskärare ett korrekt beslut. Beläggingsgraden har vi ingen information om, men då de flesta företagen är legotillverkare kan det tänkas att en hög beläggingsgrad är svår att uppnå på grund av små serier och många omställningar. Dock skall inte den positiva effekten en laserskärare har underskattas då företagen kan erbjuda den bästa tekniken vilket kan leda till fler ordergångar.

Ytterligare en brist i motiveringen av skärmetoden är att bara fyra av nio uppger kvalitet som en av de främsta parametrarna för valet, vilket vi anser är det största skälet till att välja laserskärning framför plasmaskärning.

Fem av de nio tillfrågade uppger att de inte har någon kunskap, eller begränsad kunskap om plasmaskärningens styrkor och svagheter. Detta anser vi är en stor brist och en indikation på att de inte har sett över de olika skäralternativ som erbjuds innan ett beslut fattades. Det skall dock sägas att de som anser att kvalitet är en viktig parameter också verkar vara väl insatta i plasmaskärarens svagheter.

Sammanfattningsvis har vi inte tillräckligt med information för att avgöra om företagen valt rätt skärmetod. Vi kan dock konstatera att i många av fallen skulle plasmaskärning fungera och att företagen därför borde ha satt sig in i dess egenskaper och jämfört alternativen innan inköp av maskin.

11.2 Företag med plasmaskärare

De företag som har en plasmaskärare bearbetar främst i svart stål (kolstål) samt i viss utsträckning rostfritt, aluminium och några övriga stålvarianter. Tjocklekarna varierar mellan 3-35 mm men i vissa fall upp till 100 mm, vilket är ett betydligt större intervall än för företagen med laserskärningsutrustning. Det är anmärkningsvärt att det är så få företag som bearbetar aluminium (en av sju) då denna metall som tidigare nämnts inte går att bearbeta med gasskärning samt att laserskärning har problem vid tjocklekar över cirka 6 mm.

Tre av sex (en av de tillfrågade avstod från att svara på denna fråga) svarade att priset var en viktig faktor vid val av bearbetningsmetod. En högre andel av dessa uppgav alltså pris som en avgörande faktor än för företagen med laserskärare vilket tyder på att de tre företagen med plasmaskärare har gjort en korrekt avvägning mellan dessa metoder. De övriga fyra företagen som inte uppgav pris som en avgörande faktor ställer dock inte några speciella krav på ytfinheten vilket gör att en laserskärare inte utnyttjas till sin fulla kapacitet. Fem av de sju tillfrågade har även en gasskärare i sin maskinpark som ett komplement till plasmaskäraren. Det kan därför tänkas att även dessa har gjort ett korrekt beslut vad gäller ekonomi och kvalitet. Dock ser vi en begränsning i vår marknadsundersökning för denna punkt då vi inte undersökte vilken kunskap dessa företag hade om andra termiska skärmetoder.

11.3 Företag med gasskärare

Endast två företag med gasskärare besvarade frågeformuläret vilket gör att analysen blir ytterligare begränsad. Det som kan sägas är att dessa företag bearbetar i ett större tjockleksintervall (materialtjocklekar från 10-100 mm) samt ställer låga krav på ytfinhet. Beroende på fördelningen i tjockleksintervallet samt hur stora serier som tillverkas skulle en plasmaskärare kunna utgöra ett komplement till gasskäraren. Särskilt eftersom att inget företag hade med pris som avgörande faktor för valet av metod. Dock uppger företagen att de vill ha möjlighet att skära i olika tjocklekar vilket gör att en gasskärare är det enda rimliga alternativet om endast en metod skall användas.

12 Potentiella utvecklingsmöjligheter

Då detta arbete i stor utsträckning går ut på att förklara hur metoden fungerar och dess begränsningar skulle vi här vilja delge läsaren om olika områden där vi anser att en utveckling kan genomföras för att ytterligare öka plasmaskärarens arbetsområde och konkurrenskraft. Vi vill poängtera att dessa endast är förslag på utvecklingsmöjligheter och inga konkreta lösningar för att öka metodens användningsområde eller funktionalitet.

12.1 Icke-ledande material

Om tekniken med ej överförd båg kunde utvecklas till att bli praktiskt användbar i industrin skulle metoden gå att använda på även icke-metalliska material vilket skulle leda till en kraftig ökning i användningsområdet. Metoden skulle då kunna konkurrera med laserskärning i större utsträckning.

12.2 Öka energitätheten i plasmastrålen

Munstycket ger som vi tidigare diskuterat upphov till en del begränsningar. Vi anser att metoden har mycket att vinna på att utveckla munstycket så att en smalare håldiameter kan erbjudas. Detta skulle innebära smalare skärnitt, mindre HAZ samt högre energitäthet i plasmastrålen. Problemet med detta är dubbelbåge. Om den inre dysan på något sätt skulle kunna isoleras bättre skulle dubbelbåge försvåras.

Ytterligare ett sätt att öka energitätheten skulle kunna vara att utveckla magneterna och deras position för att på så sätt förbättra effektiviteten. Detta eftersom att metoden i dagsläget är relativt ny och därmed också har stora utvecklingsmöjligheter.

12.3 Miljö och säkerhet

Att utveckla undervattensskärning till att bli mer energieffektiv skulle enligt oss innebära stora fördelar med avseende på operatörens säkerhet och miljön. I dagsläget är metoden mycket energikrävande vilket gör att användningen blir begränsad. Istället föredras vanlig plasmaskärning vilket medför vissa risker för operatören. Dock ser vi ingen självklar teknisk lösning som skulle kunna åstadkomma detta.

12.4 Dubbelbåge

Dubbelbåge beror som tidigare diskuterats på att den inre dysan är gjord i ett ledande material (vanligtvis koppar) vilket möjliggör fenomenet. Om denna istället kunde delas upp i två delar, en yttre rörlig del och en inre fast del, där den inre skulle vara gjord i ett icke-ledande material (exempelvis keram) och den yttre i ett ledande material kunde fenomenet avhjälpas helt. Detta genom att den yttre rörliga delen skulle kunna vara framskjuten under startprocessen då dysan måste leda ström,

för att under drift dras bakåt för att på så sätt undvika en elektrisk ledning mellan dysan och elektroden/arbetsstycket. Ett problem med detta förslag är hur den rörliga delen skulle vara utformad för att undvika att störa skyddsgasens strömningsmönster.

12.5 Minimera elektroderosion

Experiment har funnit faktorer som påverkar kontinuerlig erosion, såsom strömstyrka, gastryck samt strömningsmönster vid elektroden [8]. De tre faktorerna bidrar också med direkt positiva egenskaper för plasmaskärningsmetoden, som konstaterats under arbetet. Ökad strömstyrka är i direkt relation med plasmaskärarens kapacitet vad gäller skärtjocklek och skärhastighet [29]. Att sänka strömstyrkan för att minimera erosion är därför inte en möjlighet. Enligt [8] påverkar strömstyrkan temperaturen i elektroden. Ökad temperatur leder till ökad avdunstning (evaporation) av elektrodmaterial och därmed ökar erosionstakten av elektroden. Strömstyrkans påverkan av kontinuerlig erosion kan därför minskas genom att utveckla och effektivisera kylningen av elektroden. Det är dock svårt att motverka den ökade erosionstakten orsakad av gastrycket och strömningsmönstret kring elektroden, eftersom gastrycket bland annat bidrar till att det smälta materialet blåses bort samt att det roterande strömningsmönstret för skärgasen ökar skärnsnittets kvalité.

Forskning har funnit praktiska metoder för att minska cyklisk erosion. Genom att gradvis öka strömstyrkan vid start samt gradvis sänka gastrycket vid avstängning har den cykliska erosionen kraftigt minskat [46]. Det är dock oklart vilka fysikaliska fenomen som orsakar minskningen. Förståelse kring detta skulle kunna användas för att ytterligare minimera den cykliska erosionen vid på- och avslagning.

12.6 Automatisk mätning av elektrod

I dagens plasmaskärare måste förslitningen på elektroden mätas manuellt genom att montera ned och mäta kaviteten orsakad av erosion [2][12]. Alternativet är att byta ut elektroden erfarenhetsmässigt, genom att operatören ungefärligt vet hur lång bearbetningstid elektroden håller för. Om inte elektroden byts ut i tid kan hela verktyget ta skada och behöva bytas ut [12]. En automatisk mätning vore därför en fördel. Det är dock svårt att hitta något praktiskt sätt för detta. Det smala hålet i munstycket gör det omöjligt att föra in en mätsond då munstycket är monterat. På grund av de extremt höga temperaturerna vore det inte heller möjligt att montera någon givare nära elektroden.

12.7 Öka plasmaskärarens kapacitet

Genom förståelse kring vilka parametrar som påverkar anodens placering skulle det vara möjligt att påverka dessa för att möjliggöra att anoden lokaliseras sig längre ned i skärnsnittet. Detta kan medföra att plasmaskärmetoden skulle kunna skära tjockare material. Enligt [12] finns det dock inte någon efterfrågan för plasmaskärare med högre maximal skärtjocklek än vad som erbjuds idag. Men vi anser att om plasmaskärningsutrustningarna ökade maximal skärtjocklek skulle metoden ytterligare kunna konkurrera med gasskärning.

Enligt [45] kan plasmaskärarens genomslagskapacitet ökas genom att verktyget rör sig med en långsam hastighet under genomträngandet, istället för att vara stilla som den är i dagens plasmaskärare. Genomslagstjockleken kan också ökas genom att vinkla verktyget [12]. En nackdel med denna metod är att smält material sprutas över arbetsstycket. Denna nackdel tror vi skulle kunna

minskas genom att tillverka en behållare som sänks ned framför verktyget och därigenom fångar upp det smälta materialet och minskar behovet av efterföljande operationer.

13 Slutsats och diskussion

Vi vill här presentera en kortfattad presentation av de slutsatser som arbetet har lett fram till genom att besvara de frågeställningar som presenterades i början av rapporten.

Plasmaskärning innebär att en elektrisk båge mellan plasmaskärarens elektrod och arbetsstycket värmer upp gas till ett plasmatillstånd. Den energirika och varma plasman smälter sedan ett skärnitt i arbetsstycket samtidigt som det smälta materialet blåses bort av gasens höga tryck.

En plasmaskärare består av ett flertal nyckelkomponenter. Dessa påverkar alla slutresultatet genom sin kondition, utformning och materialval. Munstyckets design strävar efter att öka energitätheten i plasmastrålen samt att koncentrera denna så mycket som möjligt genom att minska diametern på öppningen samt genom en lång och smal form. Detta görs samtidigt som designen av munstycket påverkar förekomsten av dubbelbåge. Den slutgiltiga designen blir en kompromiss mellan dessa faktorer för att säkra goda skäregenskaper samt en lång livslängd för plasmaskäraren. Skärgasen väljs för att optimera skärnittets kemiska egenskaper. Kemiska reaktioner mellan plasmagas och arbetsstycke i skärnittets yta försvårar ofta efterföljande bearbetningssteg såsom svetsning och lackering och bör därför vanligen minimeras. Ibland kan dock en kemisk reaktion vara önskvärd, t.ex. kan reaktionen mellan syret i en oxiderande skärgas och järnatomerna i låg- och olegerat stål, möjliggöra en högre skärhastighet. De vanligaste elektrodmaterialen är volfram, som används i kombination med interta och reducerande skärgaser och hafnium, som används med oxiderande skärgaser. Även zirkonium kan användas som elektrodmaterial. Önskvärda egenskaper hos elektroden är; låg elektrisk resistivitet, hög smälttemperatur, god värmeledningsförmåga, god förmåga att emittera elektroner samt god beständighet mot erosion. Vid "dual-flow"- och vatteninjektionsplasma tillförs ett skyddande medium vilket har två uppgifter, dels att skydda skärprocessen från omgivande atmosfär samt dels att koncentrera energitätheten i plasmastrålen.

Under arbetet fann vi att en plasmaskärare har en rad begränsningar och problem som minskar dess arbetsområde. De som har behandlats i detta arbete är: endast elektriskt ledande material kan bearbetas, värmepåverkad zon, vinkelfel, slagg, dubbelbåge, genomslag och konturproblem, erosion på elektroden samt tjockleksbegränsningar.

Det finns en rad aspekter som måste avvägas vid skärning med en plasmaskärare för att få ett tillfredsställande slutresultat. Exempel på dessa är: Strömstyrkan som påverkar förekomsten av dubbelbåge och ökar erosionstakten på elektroden men samtidigt ger en möjlighet att bearbeta tjockare material och med en högre skärhastighet. Om skärgasen roteras ökas energitätheten men ger samtidigt upphov till högre erosionstakt samt risken för förekomst av dubbelbåge. Ökad skärhastighet ger högre produktionstakt och mindre HAZ men samtidigt större vinkelfel och slagg. Ett ökat gasflöde ger mindre slagg men ökar samtidigt erosionstakten. Denna lista kan göras lång, det vi vill påvisa med detta är komplexiteten för plasmaskärningsmetoden och svårigheten att optimera konfigurationen för ett så fint skärnitt som möjligt men att samtidigt upprätthålla en hög produktionstakt.

Plasmaskärningens användningsområde är stort. Det är oerhört svårt att avgöra när en viss skärmetod lämpar sig bäst men vi kan generellt hävda att plasmaskärning är ett mellanting mellan laser- och gasskärning vad gäller skärhastighet, tjocklek på arbetsstycket som går att bearbeta samt skärnittets kvalitet. Medan andra termiska skärmetoder kan ha problem för vissa material så som t.ex. rostfritt stål, aluminium och koppar för laserskärning samt att gasskärning främst används på låg- eller olegerade stål, har plasmaskärning endast kravet att materialet måste vara elektriskt ledande. Laser har dock möjligheten att bearbeta icke-ledande material samt genererar ofta ett bättre skärnitt för tunna och medeltjocka material. Gasskärningen har det största tjockleksintervallet samt är den billigaste utav de tre metoderna. Med det vill vi ha sagt att respektive metod har sina för- och nackdelar. Att välja rätt skärmetod beror således på alldeles för många faktorer för att en allmän metod skall kunna skapas vilket gör att beslutet vid val av skärmetod måste fattas från fall till fall utifrån ett företags specifika behov och krav.

Genom vår begränsade marknadsundersökning har vi kommit fram till att användandet av olika skärmetoder i industrin är bristfällig i vissa avseenden. De parametrar som styr företagens val av skärmetod anser vi inte alltid överensstämmer med den teori som presenterats i detta arbete. Vidare anser vi att företagen som idag använder laserskärare skulle ha mycket att vinna genom att undersöka de alternativ som erbjuds, då en likvärdig plasmaskärare är billigare i drift och har en lägre investeringskostnad samt har kapacitet för att bearbeta de aktuella materialen med god kvalitet. Detta baserar vi på att ungefär hälften av de tillfrågade angav att de inte hade tillräcklig kunskap för att svara på vilka för- och nackdelar plasmaskärningsmetoden har. De företag som använder sig av gasskärning anser vi har gjort ett korrekt val då de aktuella tjocklekarna som dessa företag bearbetar är för stora för både laser- och plasmaskärning. Denna marknadsundersökning har som tidigare påpekats varit något bristfällig i vissa avseenden. Därför anser vi att en mer omfattande undersökning av termiska skärmetoder i företag skulle vara intressant samt gynna industrin som helhet.

Några av de begränsningar och problem plasmaskärningsmetoden har idag kan enligt oss avhjälpas med vidare forskning. I rapporten presenteras en lista på förslag för vidare forskning inom området som bl.a. innefattar: Utveckling av munstycket för att kunna skära i icke-ledande material samt förminska eller eliminera risken för dubbelbåge. Metoder för att öka energitätheten i plasmastrålen. Utveckling och effektivisering av elektrodens kylning för att minska dess erosion och därmed öka dess livslängd. Metod för att ytterligare öka genomslagskapaciteten genom annan typ av start. Vi har ej diskuterat huruvida dessa förbättringsmöjligheter är möjliga att genomföra eller ej. Därför anser vi att förslagen borde analyseras och granskas djupare för att på så sätt ytterligare öka skärmetodens konkurrenskraft.

Tack till

Vi vill här ta tillfället i akt att tacka de personer som varit behjälpliga under arbetets gång och ställt upp med sin tid för att besvara våra frågor.

Philip Mariott, SPT Plasmateknik. Särskilt tack till dig då du under hela arbetets gång tagit dig tid att svara på våra mail samt att du tog emot oss på intervju.

Anders Pettersson, Intercut Sverige AB. Stort tack för att du tog dig tid på så kort varsel samt bidrog med intressanta synpunkter.

Kjell-Arne Persson, SWEREA Kimab AB. Även här ett stort tack för att du tog dig tid med att besvara våra grundläggande frågor om tekniken.

Bo Williamsson, AGA Gas AB. Tack för dina svar på våra frågor angående gaser och dess roll i plasmaskärningsmetoden.

Medverkande företag i marknadsundersökningen. Tack för att ni tog er tid att besvara frågeformuläret.

Jan-Olof Svebéus, examinator och handledare. Stort tack för givande diskussioner under arbetets gång samt med hjälp att styra arbetet framåt.

Referenslista

1. **Lindén, Gunnar & Andréasson, Lennart.**

Termisk skärning. *Fogningsteknik*. 1998.

2. **Colt, Jim.** Cleaner consumables, cleaner cuts, better production (adapted version). *The Fabricator*. den 1 September 2008.

3. **McQuade, Kat.** Plasma, oxyfuel and laser: Matching metal cutting needs with the right cutting process. *Welding & Cutting*. 2010, Vol. 9, ss. 91-94.

4. **British Standard.** *Welding consumables — Shielding gases for arc welding and cutting*. 1999. 0-580-23240-9.

5. **Andersson, Jan-Eric.** *Plasmaskärning*. Lund : SPT Plasmateknik.

6. **Weman, Klas.** *Svetshandbok*. Karlebo, 2007. 91-47-05143-4.

7. **Azom.** azom - The A to Z of Materials. *Plasma Cutting – The History of Plasma Cutting*. [Online] den 21 November 2001. [Besöksdatum: den 30 Mars 2010.] <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1061>.

8. **Nemchinsky, Valerian A & Sewerance, W S.** What we know and what we do not know about plasma arc cutting. *Journal of physics d: applied physics*. den 3 November 2006, Vol. 39, ss. 423-438.

9. **Qianhong, Zhou et al.** The effect of plasma-gas swirl flow on a highly constricted plasma cutting arc. *Journal of physics d: applied physics*. den 15 Mars 2009, Vol. 42.

10. **Persson, Kjell-Arne.** *Forskningsledare på fogningsprocesser Swerea KIMAB AB*. [interv.] Simon Alfredsson & Fredrik Tengdelius. den 03 Mars 2010.

11. **Nationalencyklopedin.** Nationalencyklopedin. *Plasma*. [Online]

[Besöksdatum: den 15 Mars 2010.] <http://www.ne.se/plasma/1045619>.

12. **Marriott, Philip.** *Director - Global Sales & Marketing SPT Plasmateknik AB*. [interv.] Simon Alfredsson & Fredrik Tengdelius. den 29 Mars 2010.

13. **SPT Plasmateknik.** *Bruksanvisning SP4000 X-Cut400 090525*. Lund : SPT Plasmateknik, 2007.

14. **Nationalencyklopedin.** Nationalencyklopedin. *Luft*. [Online] [Besöksdatum: den 23 Mars 2010.] <http://ne.se/luft>.

15. **Venkatramani, N.** Industrial plasma torches and applications. *Current Science*. den 10 Augusti 2002, Vol. 83, ss. 254-262.

16. **Williamsson, Bo.** *Manager Laser and Oxyfuel applications AGA Gas AB*. [interv.] Simon Alfredsson & Fredrik Tengdelius. den 24 Mars 2010.

17. **Nationalencyklopedin.** Nationalencyklopedin. *Exoterm*. [Online] [Besöksdatum: den 26 Mars 2010.] <http://www.ne.se.focus.lib.kth.se/lang/exoterm>.

18. **Ramakrishnan, S et al.** Influence of gas composition on plasma arc cutting of mild steel. *Journal of physics d: applied physics*. den 21 Mars 2000, Vol. 33, ss. 2288-2299.

19. **Pettersson, Anders.** *VD/Managing Director*. [interv.] Simon Alfredsson & Fredrik Tengdelius. den 29 April 2010.

20. **Nasa.** *Nasa. Nozzles*. [Online] [Besöksdatum: den 6 April 2010.] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/nozzle.html>.

21. **Qianhong, Zhou et al.** Effects of Nozzle Length and Process Parameters on Highly Constricted Oxygen Plasma Cutting Arc. *Springer science + Business Media*. den 6 Oktober 2008, Vol. 28, ss. 729-747.
22. **Szulc, J.** Improving the durability of the electrodes for an air-plasma cutting system using the diffusion-bonding process. *Journal of materials processing technology*. den 1 April 1994, Vol. 54, ss. 166-170.
23. **Nationalencyklopedin.** Nationalencyklopedin. *Volfram*. [Online] [Besöksdatum: den 23 Mars 2010.] <http://www.ne.se.focus.lib.kth.se/volfram/basfakta>.
24. **Nationalencyklopedin.** Nationalencyklopedin. *Hafnium*. [Online] [Besöksdatum: den 23 Mars 2010.] <http://www.ne.se.focus.lib.kth.se/hafnium/basfakta>.
25. **Nationalencyklopedin.** Nationalencyklopedin. *Zirkonium*. [Online] [Besöksdatum: den 23 Mars 2010.] <http://www.ne.se.focus.lib.kth.se/zirkonium/basfakta>.
26. **Encyclopedia Britannica Online.** Encyclopedia Britannica Online. *Diffusion Bonding*. [Online] [Besöksdatum: den 12 April 2010.] <http://search.eb.com.focus.lib.kth.se/eb/article-7856>.
27. **Nationalencyklopedin.** Nationalencyklopedin. *Termisk elektronemission*. [Online] [Besöksdatum: den 7 April 2010.] http://www.ne.se.focus.lib.kth.se/termisk-elektronemission?i_h_word=termisk+emission.
28. **Nemchinsky, Valerian A.** Plasma flow in a nozzle during plasma arc cutting. *Journal of physics d: applied physics*. den 28 Juli 1998, Vol. 31.
29. **Hypertherm.** Hypertherm. *What is Plasma?* [Online] [Besöksdatum: den 14 April 2010.] http://www.hypertherm.com/en/Training_and_Education/What_is_Plasma/what_is_plasma.jsp.
30. **Bini, R et al.** Experimental study of the features of the kerf generated by a 200A high tolerance plasma arc cutting system. *Journal of materials processing technology*. den 29 Maj 2007, Vol. 196, ss. 345-355.
31. **Swedish Standards Institute. SIS.** *Svetsutrustningar - Termisk skärning - Klassificering av termiskt skurna ytor - Kvalitetsnivåer för formavvikelser och toleranser (ISO 9013:2002)*. [Online] [Besöksdatum: den 19 April 2009.] http://www.sis.se/DesktopDefault.aspx?tabName=@DocType_1&Doc_ID=33812.
32. **Kusumoto, K, Wang, J och Nezu, K.** Study on the cut surface quality of mild steel plate by oxygen plasma arc cutting (Abstract). *Yosetsu Gakkai Ronbunshu/Quarterly Journal of the Japan Welding Society*. Maj 1999, Vol. 17, ss. 201-208.
33. **L. Ya. Gradus, S. A. Meliksetyan.** A container for collecting and removing pollutants in plasma cutting. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2004, Vol. 40, ss. 421-424.
34. **Nationalencyklopedin.** Nationalencyklopedin. *Ozon*. [Online] den 6 April 2010. [Besöksdatum: den 6 April 2010.] <http://www.ne.se.focus.lib.kth.se/lang/ozon>.
35. **Karolinska institutet.** Karolinska institutet. *Ozon*. [Online] den 6 April 2010. [Besöksdatum: den 6 April 2010.]

<http://ki.se/ki/jsp/polopoly.jsp?d=11353&a=5646&cid=11355&l=sv>.

36. Nationalencyklopedin.

Nationalencyklopedin. *Nitrösa gaser*. [Online] den 6 April 2010. [Besöksdatum: den 6 April 2010.]
<http://www.ne.se.focus.lib.kth.se/lang/nitr%C3%B6sa-gaser>.

37. Arbetsmiljöverket. Arbetsmiljöverket.

Fördjupning - Störande ljudnivåer. [Online] den 6 April 2010. [Besöksdatum: den 6 April 2010.]
http://www.av.se/teman/datorarbete/forebygg/lokaler/fordjupning_ljud.aspx.

38. Arbetsmiljöverket. *Arbetsmiljöverkets författningssamling*, BULLER. Stockholm : Arbetsmiljöverket, 2005.

39. Arbetsmiljöverket. *Artificiell optisk strålning*. 2009, Arbetsmiljöverkets föreskrifter om artificiell optisk strålning.

40. Svetskommissionen. Svetskommissionen. *Plasmaskärning*. [Online] [Besöksdatum: den 6 April 2010.]
<http://www.svets.se/tekniskinfo/termiskskarning/plasmaskarning.4.ec944110677af1e8380009776.html>.

41. Callister, William D Jr. *Materials science and engineering an introduction*. New York : Wiley, 2007. 978-0-471-73696-7.

42. Nemchinsky, Valerian A & Sewerance, W S. Plasma arc cutting: speed and cut quality. *Journal of physics d: applied physics*. den 18 September 2009, Vol. 42, ss. 1-7.

43. Colombo, V. et al. High-speed imaging in plasma arc cutting: a review and new

developments. *Plasma sources science and technology*. den 31 Mars 2009, Vol. 18.

44. Nemchinsky, Valerian A. Dross formation and heat transfer during plasma arc cutting. *IOP Publishing Ltd*. den 7 April 1997, Vol. 30.

45. Nemchinsky, V A, Severance, W S och Showalter, M S. Piercing of a metal slab by a plasma jet during plasma arc cutting. *Journal of physics. D, Applied physics*. 1999, Vol. 32, ss. 1364 -1369 .

46. Peters, John et al. Erosion mechanisms of hafnium cathodes at high current. *Journal of physics d: applied physics*. den 17 Mars 2005, Vol. 38, ss. 1781-1794.

47. Peters, John et al. Relating Spectroscopic Measurements in a Plasma Cutting Torch to Cutting Performance. *Springer Science + Business Media*. den 4 April 2008, Vol. 28, ss. 331-352.

48. Nemchinsky, Valerian A. Cyclic erosion of a cathode in high-pressure arcs. *Journal of physics d: applied physics*. den 18 Juni 2003, Vol. 36, ss. 1573-1576.

49. Nemchinsky, Valerian A & Showalter, M S. Cathode erosion in high-current high-pressure arc. *Journal of physics d: applied physics*. den 26 Februari 2003, Vol. 36, ss. 704-712.

50. Komatsu. Fineplasma. *Razor - fine plasma cutting technology*. [Online] [Besöksdatum: den 6 April 2010.]
http://fineplasma.com/kai/ctd/en/razor/pdf/g9120_g940_fineplasma.pdf.

Bilagor

Bilaga 1 – Tabell över skärhastighet vid olika strömstyrka och tjocklek

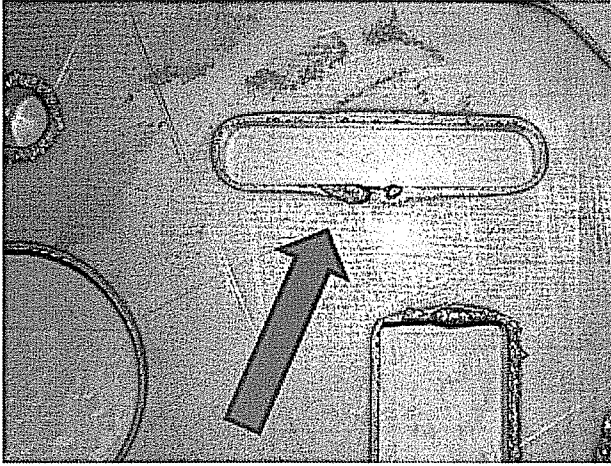
Material thickness	Current	Ignition height	Piercing height	Cutting height	Arc voltage	Pierce delay	Cutting Speed
mm	A	mm	mm	mm	volts	s	mm/min
0.5	30	2.3	2.3	1.3	114	0.1	5355
0.8		2.3	2.3	1.3	115	0.2	4225
1		2.3	2.3	1.3	116	0.3	3615
1.5		2.3	2.3	1.3	119	0.3	2210
2		2.7	2.7	1.5	120	0.4	1490
2.5		2.7	2.7	1.5	122	0.4	1325
3		2.7	2.7	1.5	123	0.5	1160
3	130	5.0	5.0	2.5	124	0.1	6505
4		5.6	5.6	2.8	126	0.2	5550
5		5.6	5.6	2.8	127	0.3	4970
6		5.6	5.6	2.8	127	0.3	4035
8		6.0	6.0	3.0	129	0.3	3150
10		6.0	6.0	3.0	130	0.3	2680
12		6.6	6.6	3.3	132	0.5	2200
15		7.6	7.6	3.8	135	0.7	1665
20		7.6	7.6	3.8	138	1.0	1050
25		7.6	7.6	4.0	141	1.8	550
30*		4.5	NR	4.5	158	NR	375
6	200	6.6	6.6	3.3	124	0.2	5250
8		6.6	6.6	3.3	125	0.3	4780
10		6.6	6.6	3.3	126	0.3	3460
12		6.6	6.6	3.3	128	0.5	3060
15		8.2	8.2	4.1	131	0.6	2275
20		8.2	8.2	4.1	133	0.8	1575
25		10.2	10.2	5.1	143	1.0	1165
30		10.2	10.2	5.1	144	1.3	750
40*		5.1	NR	5.1	154	NR	480
50*		5.1	NR	5.1	163	NR	255

Skärparametrar för stål med O₂ som skärgas, O₂ som skyddsgas vid 30 A annars luft. Tabell från[13].

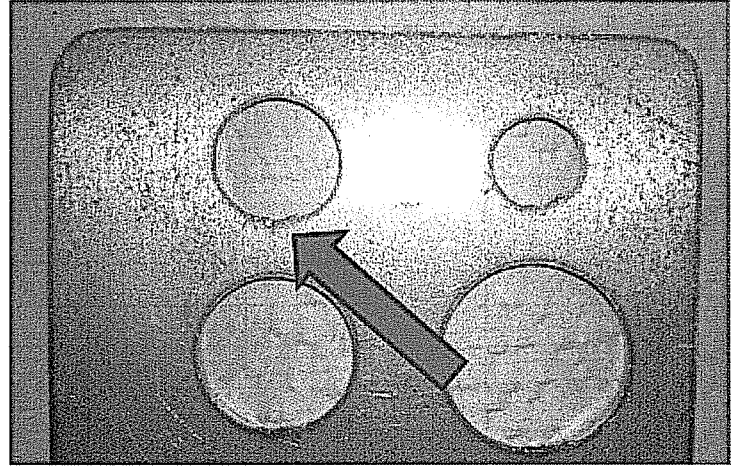
* = Kantstart rekommenderas

NR = Not recommended

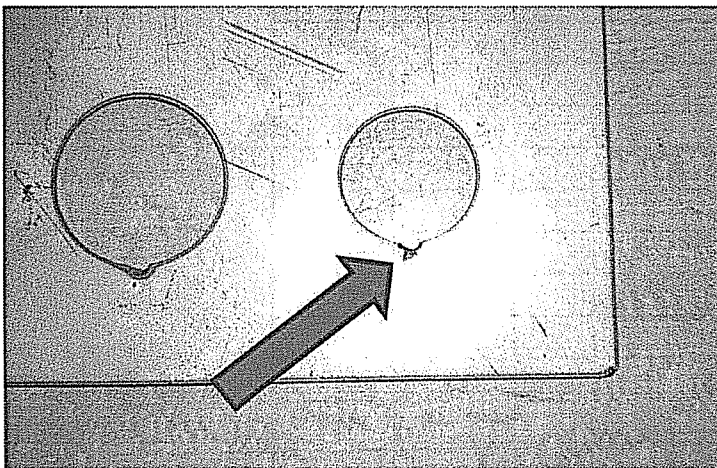
Bilaga 2 – Bilder på olika defekter efter bearbetning med plasmaskärare



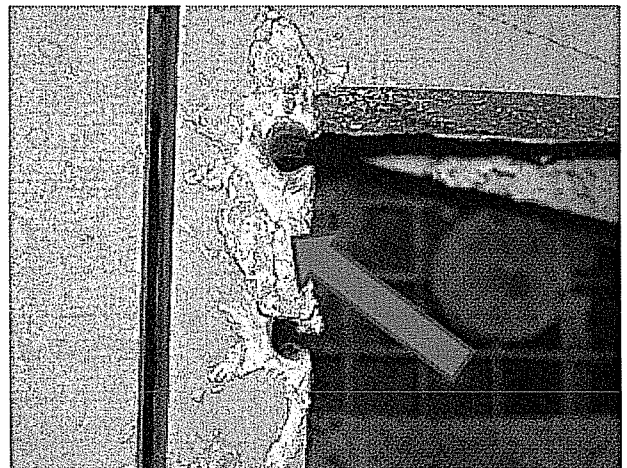
Figur 13 Slagg på undersidan av arbetsstycket



Figur 14 Näsa



Figur 15 Skärsår



Figur 16 Slagg på ovansidan av arbetsstycket efter genomslag

Bilaga 3 – Marknadsundersökningen

Till företag med plasmaskärare

- Vad använder ni er plasmaskärare till idag? Vad används detaljerna till? I vilket material och vilken tjocklek är detaljerna?
- Vilka gaser använder ni till er plasmaskärare?
- Vilka krav ställs på ytfinhet för den bearbetade detaljen?
- Varför valde ni plasmaskärare som metod istället för andra metoder? (Laser-, gas-, vattenskrining eller pressning/stansning)
- Vilka parametrar styrde valet? (Ytfinhet, pris, kunskap, underhåll, livslängd, energiåtgång, miljöpåverkan etc)
- Vilka efterföljande bearbetningssteg sker för detaljen? (Slipning, svetsning, lackering etc.)
- Är ni nöjda med prestandan från er plasmaskärare? Om ni skulle investera i en ny skärmaskin idag, skulle ni välja samma metod? (Varför/Varför inte?)
- Vad anser ni att plasmaskärarens största svaghet och styrka är?

Till företag med laserskärare

- Vad använder ni er laserskärare till idag? Vad används detaljerna till? I vilket material och vilken tjocklek är detaljerna?
- Vilka krav ställs på ytfinhet för den bearbetade detaljen?
- Varför valde ni laserskärare som metod istället för andra metoder? (Plasma-, gas-, vattenskrining eller pressning/stansning)
- Vilka parametrar styrde valet? (Ytfinhet, pris, kunskap, underhåll, livslängd, energiåtgång, miljöpåverkan etc)
- Vilka efterföljande bearbetningssteg sker för detaljen? (Slipning, svetsning, lackering etc.)
- Är ni nöjda med prestandan från er laserskärare? Om ni skulle investera i en ny skärmaskin idag, skulle ni välja samma metod? (Varför/Varför inte?)
- Vad anser ni att laserskärarens största svaghet och styrka är?
- Vilka svagheter anser ni att en plasmaskärare har?

Till företag med gasskärare

- Vad använder ni er gasskärare till idag? Vad används detaljerna till? I vilket material och vilken tjocklek är detaljerna?
- Vilka krav ställs på ytfinhet för den bearbetade detaljen?
- Varför valde ni gasskärare som metod istället för andra metoder? (Plasma-, laser-, vattenskrining eller pressning/stansning)
- Vilka parametrar styrde valet av skärmetod? (Ytfinhet, pris, kunskap, underhåll, livslängd, energiåtgång, miljöpåverkan etc)
- Vilka efterföljande bearbetningssteg sker för detaljen? (Slipning, svetsning, lackering etc.)
- Är ni nöjda med prestandan från er gasskärare? Om ni skulle investera i en ny skärmaskin idag, skulle ni välja samma metod? (Varför/Varför inte?)
- Vad anser ni att gasskärarens största svaghet och styrka är?
- Vilka svagheter anser ni att en plasmaskärare har?

Bilaga 4 – Sammanställning av marknadsundersökningen

Laserskärning

Företag, (skärmetoder)	Material	Tjocklek	Efterföljande bearbetningssteg	Ytfinhetskrav	Parametrar som styrts valet av metod	Plasmaskärarens svaghet/styrka
L-A, (laser & plasma)	Stål 355	1-20	Bockning, svetsning, lackering	-	Måttnoggrannhet och kapacitet	Dålig måttnoggrannhet
L-B, (laser & vatten)	Rostfritt och svart	10-12 rf <15 s	Svetsning, borrarin/gängning, gradning, svarvning, kantpressning, trumling, blästring	Ursprungsplåtens ytfinhet	Behov, maskinens kvalitet samt förmåga att skära i rör	Ingen kunskap om metoden
L-C, (laser)	Rostfritt och aluminium	0,5 – 20	kantpressning, stansning, svetsning, slipning, maskinbearbetning, blästring, montering mm	Ra 0,8	God kunskap om metoden gjorde att denna föredrogs.	För dåligt insatt
L-D, (laser)	Rostfritt	1-15	Lätt industrigradning	Oberörd av skärningen	Pengarna från konkurrensen.	Låg noggrannhet, hög värmepåverkan samt inga oxidfria snitt.
L-E, (laser)	Rostfritt, aluminium, mässing och koppar	-	Kantpressning, svetsning och slipning.	Kunden bestämmer utifrån vilken teknik som används.	Kostnadseffektiv och flexibel	Vet ej, har hört att piercingen (genomslaget) sliter hårt på munstycket. Ej samma precision.
L-F, (laser)	Rostfritt, aluminium, förzinkad plåt och elektroplåt	0,3 – 20, RF <12 Al <8	allt ifrån ingen till en varierande kejd av: gradning, maskinbearbetning (fräsning/borrning/gängning), bockning, stansning, svetsning, montering, ytbehandling	Inga slaggrester, grader - vassa kanter	Skärkvalité, tillgänglighet, service, prestanda och total ekonomi. Tillhörande programvara för beredning.	Som svar på anledning till varför dom valde laser: Effektivaste skärmetoden inom dom plåttjocklekar/volymer vi arbetar med. (0,3 mm – 20 mm)
L-G, (laser)	Har ingen egen, köper laserskurna	-	Bockning	Inget sprut eller skägg	Flexibiliteten	-

	detaljer					
L-H, (laser)	Rostfritt & aluminium	0,5-12	Slipning, svetsning, kantning	Höga krav på snittytan för att minska efterarbete	Ytfinheten	Skär inte lika fint, mycket grader, sned skäryta
L-I, (laser)	Svart, rostfritt och aluminium	0,3-12 huvudsakligen 1-4	gradning, trumling, bockning, svetsning, fräsning, blåstring och målning	Rep fritt större krav anv. plastad plåt	en kombination av pris och tillgänglighet och inte minst service	Långsam och inte tillräcklig exakthet. Har egentligen inte tittat så mycket på metoden.

Plasmaskärning

Företag, (skärmetoder)	Material	Tjocklek	Efterföljande bearbetningssteg	Ytfinhetskrav	Parametrar som styrts valet av metod	Plasmaskärarens svaghet/styrka	Skärgas
P-A, (plasma & gas)	Svart	2-20	Slipning och ofta svetsning	1-3 mm i tolerans	Billig i förhållande till kapaciteten	Klarar tjockare material än laser. Dålig precision för små hål.	Luft och oxygen
P-B, (plasma & gas)	Vanlig plåt, hardox, core-ten rostfritt och aluminium.	-	Slipning, svetsning och lackering	95% av tillverkningen får tillräcklig ytfinhet med plasmaskärare	Ytfinhet, pris, kunskap, underhåll, livslängd, energitåg, miljöpåverkan.	Snabb och billig. Ser ingen egentlig svaghet.	Oxygen, nitrogen, Noxal7, Arcal 1
P-C, (plasma & vatten)	Rostfritt	3-100	Kunden sköter detta själv.	Använder andra metoder vid speciella behov.	Den enda effektiva metoden när vi började med bearbetning.	Hög skärhastighet, sämre toleranser.	Vet ej.
P-D, (plasma & gas)	Rostfritt och konstruktionss tål	3-50	Svetsning, slipning, svarvning och fräsning	Variande krav. Ibland krävs efterbearbetning.	-	Dålig precision, särskilt vid tvär riktändring. Hög produktivitet.	Plasmagas: Fourier 5, Varigon H35, nitrogen eller oxygen. Skyddsgas:

P-E, (plasma)	Höghållfast plåt	6-15 vanligtvis. Maskinen klarar 0,5-35	Slagning/blästring + mer efter kunds önskemål	Normalt ganska höga krav.	Ytfinhet, pris, kunskap, underhåll, livslängd, energiförbrukning, miljöpåverkan.	Lutande skärnitt och dyra slitdelar. Okänslig för rost och skär allt som är elektriskt ledande.	nitrogen eller luft. Oxygen och nitrogen huvudsakligen
P-F, (plasma & gas)	Svartplåt	3-35	Gradning, blästring, maskinbearbetning, målning.	Små krav.	Valfriheten att kunna skära i flera material!	Olika material och att man kan köra svetsningsfaser om man har vinklingsbart huvud. Skärnittets yta blir härdad pga HAZ vilket försvårar maskinbearbetning.	-
P-G, (plasma & gas)	Svart stålplåt slitstål, S235/S275/S355/S690QL/slitstål/P265m.m.	3-35	Främst borttagning av slagg. Utöver det: bockning, riktning, fräsning, borrar, märkning, målning, mm	Mycket olika. Toleranser vanligare krav.	Passade bra in i kundsegmentet samt företagets målgrupp.	Värmepåverkan och snabbhet bra jämfört med gas. Bra tolerans. Dåligt med ljudnivån.	Syrgas

Gasskärning

Företag, (skärmetoder)	Material	Tjocklek	Efterföljande bearbetningssteg	Ytfinhetskrav	Parametrar som styrts valet av metod	Plasmaskärarens svaghet/styrka
G-A, (gas)	-	10-100	Slip & gradning vid behov	God	Liten och kompakt.	Den klarar inte varierande tjocklekar
G-B, (gas)	Stålplåt	10-50	Slipning, svetsning, lackering, förzinkning, galvanisering	Låga krav ställs	-	Att den inte klarar tjocka material