

CODEN:LUTMDN/(TMMV-5259)/1-77/2013



LUND UNIVERSITY  
Lund Institute of Technology

## **Produktions- och konstruktionsanalys av accelerator tekniska komponenter**

Anders Andersson

Mike Olsson

2013

INSTITUTIONEN FÖR MASKINTEKNOLOGI

AVDELNINGEN FÖR INDUSTRIELL PRODUKTION

LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA



# Förord

Utfört examensarbete har uppkommit efter diskussioner med Professor Jan-Eric Ståhl vid avdelningen för Industriell Produktion LTH Lunds universitet och Professor Claes Fahlander för avdelningen Kärnfysik vid Lunds universitet. Arbetet har anknytning till det regionala CATE-projektet och det nybildade kompetenscentrat ProMatEn vid LTH, Lunds universitet.

Ett stort tack skulle framföras till de personer som på något sätt har bidragit eller hjälpt oss under arbetets gång. Ett särskilt tack ska framföras till följande personer som har bidragit extra mycket:

Professor Jan-Eric Ståhl, vår examinator för avdelningen Industriell Produktion LTH, Lunds universitet som har bidragit med stor sakkunskap inom skärande bearbetning, tillverkningsproduktion och den förkunskap som vi har erhållit från tidigare kurser.

Professor Claes Fahlander, vår handledare på avdelningen Kärnfysik, Lunds universitet som har delat med sig av sina kunskaper inom området partikelacceleration och hjälpt oss styra upp examensarbetet.

Teknisk doktor Volodymyr Bushlya, vår handledare på avdelningen Industriell Produktion LTH, Lunds universitet som har delat med sig av sin kunskap inom skärande bearbetning och hjälpt oss utföra experiment med niob.

Doktorand Fredrik Schultheiss, experimenthandledare för avdelningen Industriell Produktion LTH, Lunds universitet har hjälpt oss med allmän rådgivning och kunskap inom skärande bearbetning och utfört experiment med koppar.

Lund, Mars 2013.

Anders Andersson och Mike Olsson



---

# Sammanfattning

En partikelaccelerator består av ett stort antal komponenter där det bland annat ingår ett flertal accelerationsmoduler som i sin tur består av en eller flera kaviteter. Kaviteterna är en viktig och komplex komponent i accelerationsprocessen och består oftast av oxidfri koppar (OFC) eller niob. Dessa två material är speciella när det kommer till skärande bearbetning då det finns väldigt lite information generellt om materialen och framförallt hur de kan bearbetas.

Målet med detta arbete är att göra en konstruktions- och produktionsanalys av en kavitet för att se hur den kan produceras på ett enkelt och billigt sätt.

En systematisk utvecklingsmetod togs fram för att undersöka hur kaviteterna kunde förbättras ur ett produktionsperspektiv. Där listades alla ingående produktionssteg; vilken slags bearbetning, toleranskrav, funktionsstyrande eller produktionskritisk operation. Detta gjordes för att ta reda på vilka operationer som har en funktion som inte går att ändra på och samtidigt ta reda på vilka operationer eller toleranser som är möjliga att ändra på. Vidare gavs exempel på förslag för olika operationer som kan tänkas vidareutvecklas för att underlätta produktionen av kaviteten. Denna metod kan även användas för andra komponenter än kaviteten.

Baserat på en litteraturstudie, valdes vilken skärdata och vilka verktyg som skulle användas för de experiment som utfördes på materialen. Vid utförande av experimenten utfördes bland annat matningstrappor där matningen varierar men skärdjup och hastighet är konstanta, och skärkraftsmätningar registrerade uppkomna krafter. Experimenten utgjordes också av ytfinhetsmätningar där materialet indelades i fält för att avgränsa försöken, för de olikafälten varierade matningen och hastigheten för OFC medan skärdjupet var konstant. Vid niob experimenten varierade bara matningen. Experimenten upprepades för olika sorters verktyg där antingen geometrin skiljde för samma sorts verktyg eller att verktyget var belagd/obelagd hårdmetall eller diamantverktyg.

Utifrån resultaten från experimenten utfördes en kostnadsanalys av en kavitet. De skärdata som uppfyllde kraven på ytfinheten användes för att räkna ut en tillverkningstid för kaviteten. Tillverkningstiden sattes in i kostnadsanalysen och med resterande beräknade eller uppskattade värden fick vi fram en tillverkningskostnad för en kavitet.

Resultaten från kopparexperimenten visade att alla verktyg klarade av att komma under en ytfinhet på  $R_a$  lika med  $0.8 \mu\text{m}$  som är ett krav för kaviteten. De verktyg som uppvisade bäst resultat var de obelagda hårdmetallskären. Det beräknade skärmotståndet som baseras på uppmätta skärkrafter under experimenten tycktes vara relativt högt, vilket skulle kunna härledas till att när kopparen bearbetades noterades att verktygen puttade en krans av koppar framför sig under ingreppet vilket kan påverka skärkrafterna. Ett fenomen kallat dubbla  $a_p$  upptäcktes.

För nioben var det svårt att uppnå en bra ytfinhet, det uppkom adhesion av spånor på arbetsmaterialet som försämrade ytfinheten. Det var stor spridning på de uppmätta  $R_a$ -värdena för verktygen med en nosradie på  $0.4$  och  $0.8$  mm. Verktyget med en nosradie på  $1.2$  mm hade som bäst ett  $R_a$ -medelvärde på  $0.78 \mu\text{m}$ . Det beräknade skärmotståndet var även högt för nioben liknande det för OFC.



# Abstract

A particle accelerator consists of a large number of components, which among other things includes several acceleration modules, which consists of one or several cavities. A cavity is a complex and essential part in the accelerations process and is usually made of oxygen-free copper (OFC) or niobium. These two materials are special when it comes to metal cutting, it's hard to find information about these materials in general but also how to machine them.

The goal with this master thesis is to perform a construction and productions analysis for a cavity to find out how it can be produced in an easy and simple way. An essential part of this thesis is to find out information about OFC and niobium and how to machine them.

To examine how to improve the production of the cavities a systematic development method was developed. In this method all the different production stages were listed; what kind of machining, tolerance requirements, function controlled or production critical operation. This was made to find out which operations cannot be changed because of the functionality and which operations or tolerances that can be changed. Furthermore examples were given of different operations that can be changed to make the cavity easier to produce. This method can also be used for other components than the cavity.

Selection of cutting data and tools that were used in the experiment were based on literature studies for the materials. One of the performed experiments was steps with increasing feeds while cutting depth and speed remained constant, cutting forces were measured during the experiment. In another experiment surface finishes were measured, for OFC cutting speed and feed varied while cutting depth was constant. For the niobium experiments it was only the feed that varied. These experiments were repeated for different kinds of tools where the geometry of the tool differed or if the tools were coated/uncoated carbide or diamond tool.

From the results of the experiments a cost analysis was performed for a cavity. The time it takes to manufacture one cavity is calculated with the cutting data that are based on the results which satisfies the requirements of the surface finish. From the calculated manufacturing time and other calculated or estimated variables we calculated the manufacturing cost for one cavity.

Our conclusions from the results were that all of the tools from the copper experiments can be used to achieve a surface finish of  $R_a$  0.8  $\mu\text{m}$  or better which is a requirement for the cavity. The tools that showed the best result were the uncoated carbide tools. Calculated cutting resistance that is based on the measured cutting forces from the experiment seemed to be surprisingly high, which can have connections to the ring of material that the tools pushed ahead of itself during the operation. From the results from the niobium experiments our conclusions are that it's hard to achieve a good surface finish because of the adhesion of chips on the workpiece. There was a big variation in the measured  $R_a$  values for the tools with a nose radius of 0.4 and 0.8 mm. The best achieved  $R_a$  average value was 0.78  $\mu\text{m}$  with the tool that had a 1.2 mm nose. Calculated cutting resistance was high for the niobium, similar to the OFC cutting resistance.





---

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund	1
1.2	Problemformulering	1
1.3	Avgränsningar	2
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>3</b>
2.1	Skär- och verktygsgeometri	3
2.2	Skärdata	4
2.3	Skärkrafter	5
2.4	Skärmotstånd	6
2.5	Ytfinhet	6
2.6	Lösegg	8
2.7	Detaljkostnad	8
2.8	Materialegenskaper	10
<b>3</b>	<b>Litteraturstudie</b>	<b>13</b>
3.1	Koppar	13
3.2	Niob	21
3.3	Sputtring	22
<b>4</b>	<b>Konstruktionsanalys</b>	<b>25</b>
4.1	Bakgrund till konstruktionsanalys	25
4.2	OFC Kaviteten	25
4.3	Systematisk utvecklingsmetod	26
<b>5</b>	<b>Experiment</b>	<b>33</b>
5.1	Material	33
5.2	Förberedelser	33
5.3	Dragprov	36
5.4	Skärdata	37
<b>6</b>	<b>Resultat</b>	<b>41</b>
6.1	Koppar	41
6.2	Niob	52
6.3	Polära diagram	59
6.4	FEM-analys	60
<b>7</b>	<b>Kostnadsanalys</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>67</b>
	<i>Litteraturförteckning</i>	<b>69</b>
	<b>Bilaga 1</b>	<b>71</b>
	<b>Bilaga 2</b>	<b>72</b>
	<b>Bilaga 3</b>	<b>74</b>
	<b>Bilaga 4</b>	<b>76</b>



---

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

För att få upp Sveriges tillverkningsandel inom CERN, alltså hur mycket som levereras från landet till CERN, har ett projekt inletts kallat CATE-projektet. CATE, som står för Cluster for Accelerator Technology, är ett skandinaviskt samarbete för att öka kompetensen inom acceleratorteknik. Universitet i Skandinavien erbjuder företag i regionen kurser inom acceleratorteknik för att de i ett senare skede ska kunna vara mer konkurrenskraftiga gällande upphandlingskontrakt med CERN. Upphandlingskontrakten avser konstruktion, tillverkning och underhåll av avancerad utrustning. Exempel på framtida forskningsanläggningar inom regionen är European Spallation Source (ESS) och MAX IV i Lund men även andra forskningsanläggningar ute i Europa bland annat CERN.

Kurser ska även ges i material- och skärteknik för att de tillverkande företagen ska få en bättre inblick i var problematiken ligger när man försöker sig på att bearbeta exotiska material som koppar och niob. Koppar är högaktuellt inom CATE-projektet där flera kaviteter tillhörande en partikelaccelerator kallad HIE-ISOLDE ska produceras och niob kommer att vara aktuellt för kaviteterna i ESS partikelacceleratorer.

Partikelacceleratorn vid ESS kommer att användas inom material-, biovetenskap samt medicin och kan liknas vid ett högteknologiskt supermikroskop. Där accelereras protoner från väte upp till ljusets hastighet och de kolliderar sedan med atomkärnor från ett mål-material. När kollisionen sker kommer neutroner att sändas ut och dessa används sedan för att undersöka olika material.

För att bygga upp kompetensen inom dessa grundämnen och speciellt deras skärbarhet och användning inom konstruktioner har vi fått i uppdrag att göra ett examensarbete som behandlar de olika problemen. Förutom att samla på sig kunskap om materialen ska ett systematiskt tillvägagångssätt tas fram i form av en metod som används på nya acceleratorkomponenter som ska produceras. Metoden ska kategorisera alla operationer och komma fram till om produkten går att förbättras produktionsmässigt utan att inkräkta på funktionen.

Förhoppningsvis kommer våra studier i examensarbetet att användas i ett framtida kompetenscentrum som kommer att arbeta mellan företag och den nystartade forskningsanläggningen (ESS och MAX IV) i Lund.

## 1.2 Problemformulering

I en partikelaccelerator används komponenter som tillverkas av lite mer exotiska material som oxidfri koppar eller niob. Med exotiska material menas material som inte används lika frekvent vid tillverkning av detaljer i en produktionsindustri. Exotiska material kan ha önskvärda egenskaper som hög elektrisk ledningsförmåga, ge en ökad hållfasthet eller ha en hög korrosionsbeständighet. Eftersom exotiska material inte används lika ofta vid produktion av detaljer har detta lett till att det är svårare att hitta information om vilka verktyg och skärdata som bör användas vid bland annat skärande bearbetning av materialen. Informationsbristen märks för oxidfri koppar men kanske främst för niob där man enbart kan hitta ett fåtal artiklar om hur man bearbetar materialet.

---

I nuläget produceras en väldigt liten del av accelerationskomponenter i Skandinavien. Bygget av MAX IV och ESS i Lund kräver leveranser av accelerationsmoduler och reservdelar därför är det en fördel om lokala produktionsföretag har kunskap och förståelse för hur man bearbetar exotiska material för att kunna bistå med komponenter på ett snabbt sätt.

De komponenter som tillverkas till en partikelaccelerator har ofta höga krav på toleranser och att ytfinhetskrav uppnås. Oftast är dessa krav kopplade till ett funktionskrav för komponenten men i vissa fall kan ett funktionskrav vara satt på ett sätt som gör att komponenten blir svårare och dyrare att producera. Genom att gå igenom ritningar och se över vilka produktionssteg som krävs för att tillverka detaljen kan man förhoppningsvis hitta och om möjligt förändra vissa tillverkningsoperationer, detta för att underlätta produktionen av detaljen utan att funktionen påverkas. Förhoppning är att man kan spara både tid och pengar vid tillverkning av detaljen.

Målet med detta arbete är att ta fram en metod som man kan använda för att gå igenom en ritning av en komponent för att om möjligtvis göra den lättare och billigare att producera. Genom att ta fram skärdata och testa olika verktyg för oxidfri koppar och niob ska man sedan kunna göra rekommendationer till produktionsföretagen för hur man bearbetar materialen genom skärande bearbetning.

## 1.3 Avgränsningar

Rapporten riktar sig främst till en publik med högskole- eller universitetsutbildning men även till ett produktionsföretag och dess anställda.

Vi kommer i första hand avgränsa oss till svarvning av koppar med obehandlade och behandlade hårdmetallskär samt diamantskär.

Experimenten av niob kommer att avgränsas till svarvning med obehandlade hårdmetallsskär med tre olika nosradier.

Valen av skärverktyg och skärdata har gjorts utifrån litteraturstudien för att begränsa antalet experiment.

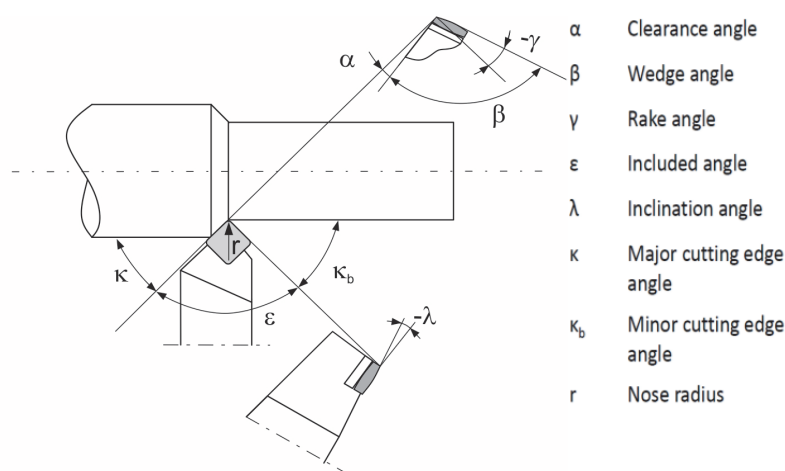
Studien har begränsats till att endast studera kavitetskonstruktionen i acceleratormodulen. Detta på grund av att kaviteten som ska produceras till HIE-Isolde tillverkas utav koppar samt är den utmanande delen rent skärtekniskt.

---

## 2 Teori

### 2.1 Skär- och verktygsgeometri

Verktøget för skärande bearbetning kan delas in i två komponenter där den del som avverkar material är vändskäret. Vändskären är utformade i olika geometrier för att minska belastningen och därmed öka livslängden. Vändskäret sitter i sin tur i verktygshållaren på understödsplattan, som är den andra komponenten. Geometrin av de båda kan delas upp i skär- och verktygsgeometri, där vinklar som är kopplade till vändskäret hör till skärgeometrin och vinklar kopplade till verktygshållaren går under verktygsgeometrin. I Figur 1 nedan illustreras alla vinklar kopplade till skärverktygets geometri vid svarvning.



Figur 1 Verktygsgeometrins vinkel- och geometribeteckningar (1).

#### 2.1.1 Skärgeometri

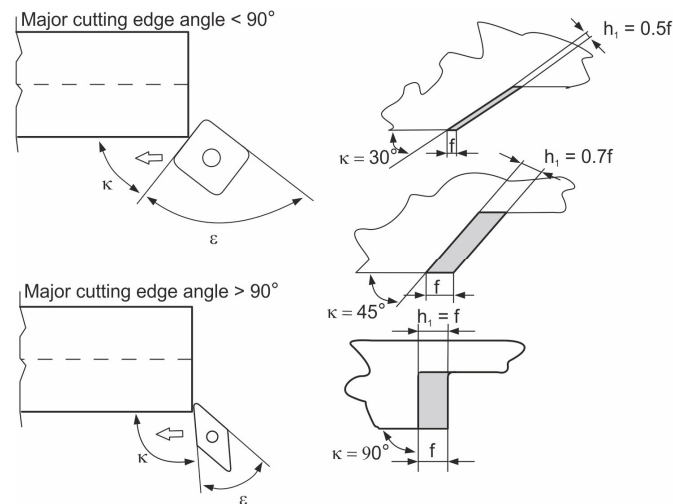
De vinklar som inte är beroende av hur skäret sitter i verktygshållaren tillhör skärgeometrin. Eggvinkeln  $\beta$  och spetsvinkeln  $\epsilon$  påverkar skärets hållfasthet och värmeledningsförmåga. Stora vinklar av de båda ger högre hållfasthet och bättre kylning av eggen på vändskäret. Eggradien  $r_\beta$  beskriver hur vasst vändskärets egg är och liknas oftast vid en cirkelbåge. En ökad nosradie  $r$  ger en bättre hållfasthet vid vändskärets spets och har stor betydelse när det kommer till ytfinheten. Släppningsvinkeln  $\alpha$  är frigången mellan vändskäret och den genererade ytan på arbetsstycket. Med tiden går denna vinkel mot  $0^\circ$  på grund av fasförslitningen av skäret. Spånvinkeln  $\gamma$  är av stor betydelse vid en skärprocess bl.a. varierar skärkrafterna med denna. Dessutom blir spånans krökningsradie olika beroende på positiv eller negativ spånvinkel. Till exempel ger en positiv spånvinkel lägre skärkrafter och större krökningsradie medan eggen blir svagare. En förstärkningsfas kan göras för att få en mer hållbar egg.

#### 2.1.2 Verktygsgeometri

Lutningsvinkeln  $\lambda$ , ställvinkeln  $\kappa$  och frivinkeln  $\kappa_b$ , även kallad biskärvinkeln, är huvudsakligen de vinklar som styr verktygsgeometrin. Ställvinkeln  $\kappa$  och frivinkeln  $\kappa_b$  ställs in genom verktygshållaren

och varierar med storleken på spetsvinkeln  $\epsilon$ . Med ställvinkeln kan man styra storleken på den teoretiska spåntjockleken  $h_1$  och dess förhållande till den teoretiska spånbredden  $b_1$ , enligt Figur 2. En minskad ställvinkel minskar  $h_1$  och ökar  $b_1$ , dessutom underlättas spånbreakningen.

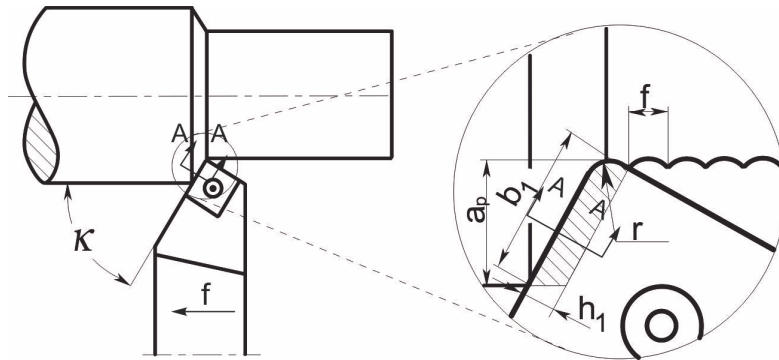
Lutningsvinkeln  $\lambda$  har betydelse för storleken på skärkrafterna och spånavgången. En negativ lutningsvinkel används vid intermittentbearbetning för gynnsammare ingrepp där skäret är starkare. Spånavgången blir dock mot arbetsstycket vilket kan skada den bearbetade ytan (1).



Figur 2 Ställvinkelns inflyttande på den teoretiska spåntjockleken  $h_1$  och spånareans formförhållande vid konstant matning  $f$  (1).

## 2.2 Skärdata

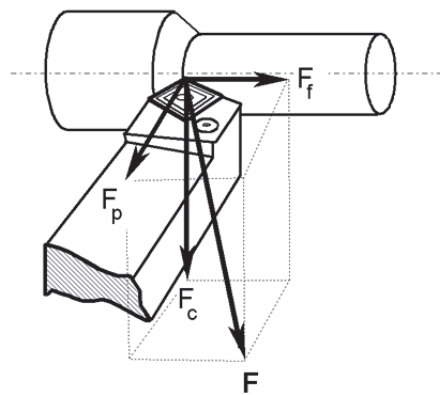
Skärdata är de parametrar som avgör hur stor mängd material som avverkas per tidsenhet. Huvudparametrarna brukar vara skärhastigheten, matningen och skärdjupet. Skärhastigheten  $v_c$  är relativhastighet som uppkommer mellan periferit på arbetsstycket och skärverktyget. Enheten för skärhastigheten är oftast [m/min]. Effektbehovet växer proportionellt med skärhastigheten. Matningen  $f$  är förflyttningen av verktyget i axiell- eller radiellriktningen per varv. I detta fall kommer axiellmatning att användas för svarvningoperationerna. Enheten för matningen är [mm/varv]. Skärdjupet  $a_p$  har även axiell- och radiellriktning beroende på om det är plan- eller längdsvärning. Eftersom längdsvärning sker i utförandet används radiella skärdjup. **Figur 3** illustrerar matningen och skärdjupet i en svarvoperation (1).



**Figur 3** Definition av ställvinkeln  $\kappa$  illustrerad vid svarvning (1).

## 2.3 Skärkrafter

I en skärprocess uppkommer skärkrafter vid själva avverkandet av spånan från arbetsstycket. Dessa mekaniska belastningar delas upp i tre kraftvektorer där huvudskärkraften  $F_c$  är den kraft ute i arbetsstyckets periferi som avverkar spånan. Matningskraften  $F_f$  är kraften i axiellriktning och uppkommer när man matar skäret längs med arbetsstycket för att bilda en spåna. Passivkraften fås i radiellriktning från arbetsstyckets rotationscentrum. Det är kraften som uppkommer när skäret trycks mot arbetsstycket under skärprocessen. **Figur 4** illustrerar skärkrafterna i skärprocessen.



**Figur 4** Skärkrafter som uppkommer vid svarvning (1).

I detta arbete kommer de statiska skärkrafterna att studeras, vilket bygger på ett medelvärde för de dynamiska skärkrafterna. Det sker variationer hela tiden av skärkrafterna, vilket gör att man inte får konstanta värden, men för rapportens syfte fungerar dessa statiska skärkrafter utmärkt (1).

---

## 2.4 Skärmotstånd

Ett mått för skärbarheten av ett material är att beräkna skärmotståndet för materialet i fråga. Då behövs några grundläggande processparametrar som teoretiska spåntjockleken  $h_1$  och - bredden  $b_1$ . Ekvation 1 och Ekvation 2 nedan beskriver de båda parametrarna.

$$h_1 \approx f \cdot \sin \kappa \quad \text{Ekvation 1}$$

$$b_1 \approx \frac{a_p}{\sin \kappa} \quad \text{Ekvation 2}$$

Skärmotståndet, med enheten  $[\text{N}/\text{mm}^2]$ , beskriver det motstånd som uppkommer på arbetsmaterialet för valda skärdata per spånarea. Med ovan nämnda ekvationer kan Ekvation 3 för skärmotståndet  $C_r$  beskrivas enligt nedan (1).

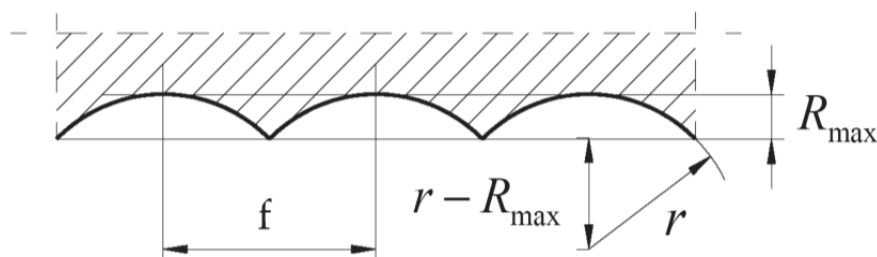
$$Cr = \frac{F_c}{h_1 \cdot b_1} \rightarrow Cr = \frac{F_c}{f \cdot a_p} \quad \text{Ekvation 3}$$

## 2.5 Ytfinhet

Ytfinheten beskriver ytans släthet och den teoretiska ytfinheten är den bästa möjliga ytfinheten som kan uppnås. Den teoretiska ytfinheten, som en skärprocess genererar, beror till stor del av nosradien  $r$  mellan huvud- och biskäret när det gäller eneggsmetoder, som till exempel svarvning.

### 2.5.1 $R_{\max}$

$R_{\max}$  beskriver det största avståndet mellan en topp och en botten. **Figur 5** nedan beskriver sambandet mellan  $R_{\max}$ , nosradien  $r$  och matningen  $f$ .



**Figur 5** Teoretiskt profildjup  $R_{\max}$  illustrerat vid svarvning (1).

Följande går att få fram ur **Figur 5** med hjälp av Pythagoras sats.



$$r^2 = (r - R_{max})^2 + \frac{f^2}{4} \rightarrow r^2 = r^2 - 2rR_{max} + R_{max}^2 + \frac{f^2}{4}$$

Efter utbrytning erhålls den teoretiska  $R_{max}$  enligt Ekvation 4 nedan.

$$R_{max} = r - \sqrt{r^2 - \frac{f^2}{4}} \approx \frac{f^2}{8 \cdot r} \quad \text{Ekvation 4}$$

Det förutsätts att en cirkelbåge genereras under skärprocessen för att endast nosradien  $r$  och matningen  $f$  ska ge den teoretiska  $R_{max}$ . Villkoret nedan i Ekvation 5 ska vara uppfyllt för att teoretiska  $R_{max}$  ska kunna ligga någorlunda nära verkliga  $R_{max}$ .

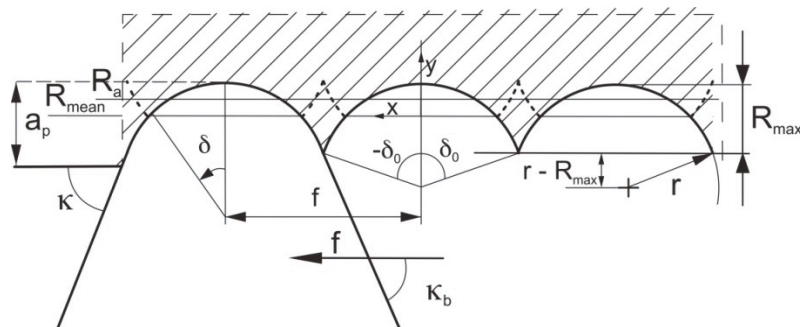
$$\sin \kappa_b \geq \frac{f}{2 \cdot r} \quad \text{Ekvation 5}$$

$$f \leq 2 \cdot \sqrt{a_p \cdot (2r - a_p)} \leq 2 \cdot r, \quad a_p \leq 2 \cdot r$$

Där  $\kappa_b$  är frivinkeln.

## 2.5.2 $R_a$

$R_a$  definieras nedan enligt Ekvation 6 och är en internationell standard för att beskriva avvikelsen av en yta från en tänkt genomsnittlig nivå. En illustration av  $R_a$ -linjen visas i Figur 6.



Figur 6 Teoretisk ytfinitet vid svarvning (1).

$$R_a = \frac{1}{L_m} \cdot \int_0^{L_m} |y| \cdot dx \quad \text{Ekvation 6}$$

---

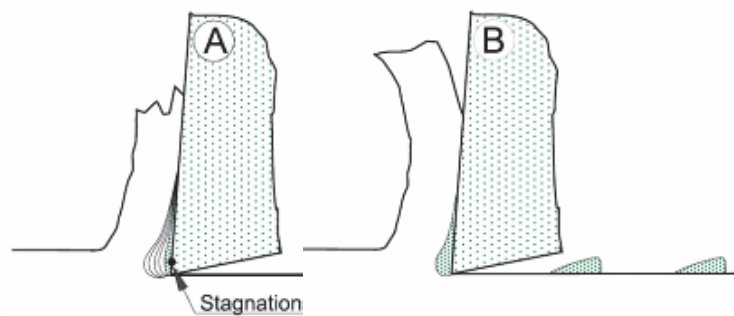
Härledning från ”Metal cutting – theories and models” ger Ekvation 7 nedan, som används i arbetet för att beräkna den teoretiska ytfinheten,  $R_a$  (1).

$$R_a \approx 0.77 \cdot \left[ 1 - \frac{\frac{f}{2 \cdot r}}{\arcsin\left(\frac{f}{2 \cdot r}\right)} \right] \cdot r$$

Ekvation 7

## 2.6 Lösegg

Lösegg är ansamling av arbetsmaterial på skärverktygets egg. Löseggar kan vara förödande för ytfinheten om dessa skulle lossna från verktyget och fästa sig på arbetsstycket istället för att följa med spånan. Löseggsbildningen beror av processtemperaturen där en låg temperatur ger lättare löseggsbildning. Genom att öka temperaturen via ökad skärhastighet eller matning kommer löseggen att minska eller försvinna. Skärvätska kyler och sänker processtemperaturen vilket är gynnsamt för löseggsbildning. Figur 7 visar avsättning på skäreppen och avgången på arbetsmaterialet.



Figur 7 Löseggsbildning (1).

Löseppen på arbetsmaterialet är hårdare än ursprungsmaterialet eftersom material packas framme vid stagnationspunkten på skäret och deformerar materialet (1).

## 2.7 Detaljkostnad

En förenklad kostnadsanalys  $k$ , för en detalj kan beräknas genom att ta hänsyn till följande kostnadsposter. Materialkostnad  $k_B$ , utrustningskostnad under drift  $k_{CP}$ , utrustningskostnad vid stillestånd  $k_{CS}$  och lönekostnad  $k_D$ . Formeln för detaljkostnad visas i Ekvation 8.

Där  $N_0$  är antalet detaljer, och  $t_0$  är produktionstiden för en detalj i minuter och  $T_{su}$  är ställtiden. I de olika kostnaderna tar man hänsyn till olika faktorer beroende på vilken kostnad man är ute efter. De olika faktorerna är kassationsandelen  $q_Q$ , materialspillfaktorn  $q_B$ , taktförlusten  $q_P$  och stilleståndsandelen  $q_S$ .

$$\begin{aligned}
k = & \frac{k_B}{N_0} \left[ \frac{N_0}{(1 - q_Q)(1 - q_B)} \right]_b + \frac{k_{CP}}{60N_0} \left[ \frac{t_0 N_0}{(1 - q_Q)(1 - q_P)} \right]_{cl} \\
& + \frac{k_{CS}}{60N_0} \left[ \frac{t_0 N_0}{(1 - q_Q)(1 - q_P)} * \frac{q_s}{(1 - q_s)} + T_{su} \right]_{c2} \\
& + \frac{k_D}{60N_0} \left[ \frac{t_0 N_0}{(1 - q_Q)(1 - q_S)(1 - q_P)} + T_{su} \right]_d
\end{aligned}$$

*Ekvation 8*

Utrustningskostnaderna  $k_{CS}$  och  $k_{CP}$  byggs upp av olika kostnadsposter som till exempel lokalkostnad, underhålls- och reparationskostnader, rörlig driftskostnad och renoveringskostnader se Ekvation 9 och Ekvation 10.

$$k_{CS} = \frac{a_f * K_0(1 + k_{ren} * N_{ren}) + Y * k_Y}{T_{plan}}$$

*Ekvation 9*

$$k_{CP} = \frac{a_f * K_0(1 + k_{ren} * N_{ren}) + Y * k_Y + T_{plan} * \left( \frac{k_{UHh}}{h_{UH}} + k_{ph} \right)}{T_{plan}}$$

*Ekvation 10*

Här betecknas grundinvesteringen med  $K_0$ ,  $k_{ren}$  är renoveringskostnadens nuvärde uttryckt i andel av grundinvesteringens  $K_0$ ,  $Y$  är den yta som är knuten till maskinutrustningen,  $k_Y$  är lokalkostnaden per kvadratmeter och  $T_{plan}$  är den produktionsplanerade tiden. Underhållskostnaden i kr/h betecknas  $k_{UHh}$ ,  $h_{UH}$  är antal driftstimmar per underhållstimme och  $k_{ph}$  är den rörliga maskintimkostnaden.

Där  $a_f$  är annuitetsfaktorn eller årsandelskostnaden och beräknas enligt Ekvation 11 nedan där  $p$  är räntefaktorn och  $n$  är antal år.  $N_{ren}$  är antalet renoveringar som behövs under bruksperioden vid sidan av ordinarie underhåll och beräknas som heltalsdelen av kvoten mellan totalt antal skift  $n * T_{plan} / h_y$  och renoveringsintervallet  $n_{syren}$  se Ekvation 12 nedan (2).

$$a_f = \frac{a}{K_0} = \frac{p * (1 + p)^n}{(1 + p)^n - 1}$$

$$a_f = a_f(p, n)$$

*Ekvation 11*

---

$$N_{ren} = trunc \left( \frac{N * \frac{T_{plan}}{h_y}}{n_{syren}} \right)$$

*Ekvation 12*

## 2.8 Materialegenskaper

Skärprocessen påverkas mycket av egenskaperna hos det bearbetade arbetsmaterialet. Det finns flera olika materialparametrar som styr skärbarheten men i arbetet och nedan kommer de viktigaste materialparametrarna att tas upp. Dessa anses ha störst inverkan på skärbarheten och med dessa kan lämplig skärdata tas fram från tidigare tester med liknande materialegenskaper.

### 2.8.1 Deformationshärdnad

Under skärprocessen kommer arbetsmaterial vid skäret att deformeras och bli hårdare än grundmaterialet. Det sker en deformationshärdning av materialet, vilket innebär att materialet packas vid stagnationspunkten och bygger upp en utökad skäreagg, se tidigare avsnitt om lössegg. Denna deformationshärdnad kan vid ett tillfälle följa med spånan eller i värsta fall fastna på arbetsstycket.

Själva deformationshärdningsgraden varierar mellan de olika arbetsmaterialen och påverkar spånbildningen vid skärprocessen. En hög grad av deformationshärdning i ett material innebär att en större mängd energi måste tillföras för spånbildningen vilket ökar skärkrafterna. Dessutom kommer den bearbetade ytan att bli hårdare.

Deformationshärdningsgraden  $S_n$  definieras enligt Ekvation 13 nedan (3).

$$S_n = \frac{R_M}{R_{p0.2}} = \frac{\sigma_B}{\sigma_S}$$

*Ekvation 13*

### 2.8.2 Duktilitet

Duktiliteten av materialet säger hur segt och formbart det är. Man kan säga att det är ett mått på hur stor plastisk deformation materialet kan klara av utan att gå av. Under en skärprocess orsakar ett arbetsmaterial med hög duktilitet förslitning på skärverktyget genom adhesion, vidhäftning. Det innebär att materialet kletar sig fast på verktyget och sliter med sig delar av skärverktyget. Hög duktilitet ger även problem med spånbrytningen eftersom spånan har hög brottöjning och bryts då inte av. Material med låg duktilitet har mindre problem med spånbrytningen eller adhesion av verktyget.

Duktiliteten för ett arbetsmaterial som ska bearbetas med skärande bearbetning använder brottöjningen  $\epsilon_b$  som mått (3).

---

### 2.8.3 Termisk konduktivitet

Den termiska konduktiven  $k$  har betydelse för processtemperaturen vid skärande bearbetning. En bra värmeledningsförmåga sänker processtemperaturen, där en ökning av  $k$  med 1 % ger en minskning av processtemperaturen med någon tiondels grad (1). Fås inte värmen bort som genereras vid plastisk deformation eller friktion under skärprocessen kommer arbetsmaterialet och verktyget att ta skada. För arbetsmaterialet kan kvaliteten, som ytfinhet och toleranser, bli lidande medan för verktyget kan stora förslitningsskador uppstå. Med en hög värmeledningsförmåga kommer värmen snabbt ledas iväg från skärzonen, vilket ger förbättrad skärbarhet (3).

### 2.8.4 Hårdhet

Hårdhetens inverkan på skärbarheten är stor. Störst inverkan har den på skärkrafterna i relation till de andra fyra parametrarna. Detta innebär även en stor inverkan på deformations- och skärmotståndet. En låg hårdhet ger bättre skärbarhet men för väldigt duktila material finns stora tendenser till löseggar, vilket leder till dålig ytfinhet, gradbildning och kort livslängd av verktyget. Då är det att föredra ett hårdare material om det också har hög duktilitet (3).

### 2.8.5 Abrasivitet

Ett arbetsmaterial har inte ett och samma hårdhetsvärde utan detta varierar beroende av positionen. Tittar man på mikrostrukturen kan denna mikrohårdhet variera mer än makrohårdheten. Det som gör ett material mer eller mindre abrasivt är inneslutningarna av hårda partiklar, som karbider och oxider, på mikroskopnivå. Flera sådana inneslutningar resulterar i en förkortad livslängd av verktyget (3).

Ett värde mellan 1-10 i abrasivitet ska tas fram där referensmaterialet har ett värde på 5. Metoden för att få fram ett värde går genom ett mikrohårdhetstest. Där låter man mäta hårdheten av ett område på 10x10 punkter och får sedan en fördelning av hårdheten.

Vid beräkandet av abrasiviteten används Ekvation 14 nedan på mätdata från mikrohårdhetstestet.

$$Ab = HV_{medel} + (HV_{95konf} - HV_{5konf})$$

*Ekvation 14*

### 2.8.6 Polära diagram

Ovan nämnda fem materialparametrar utgör grunden i ett polärt diagram där material jämförs med varandra och viktas mot ett referensmaterial. Detta referensmaterial har ett värde 5 på samtliga axlar. Material som får liknande mönster ska då bearbetas med liknande skärdata. Detta blir ett verktyg för att välja skärdata för nya okända material men där man vet deras materialegenskaper.

Följande Ekvation 15 nedan används för att räkna ut det relativa värdet  $M_x$  av duktilitet, deformationshårdnad, hårdhet och abrasivitet mot ett referensmaterial  $R$ .  $X$  står för värdet av den undersökta egenskapen och där  $G_{min}$  samt  $G_{max}$  är minsta respektive största värdet i intervallet för materialegenskapen.

---

$$M_x = 5 + 5 \cdot \frac{X-R}{R-G_{min}} \text{ för } X < R$$

*Ekvation 15*

$$M_x = 5 + 5 \cdot \frac{X-R}{G_{max}-R} \text{ för } X > R$$

När det kommer till att beräkna det relativa värdet av termisk konduktivitet gäller att ett högre värde där innebär bättre skärbarhet till skillnad från de övriga fyra. Därför fås relativvärdet  $M_x$  för termisk konduktivitet av Ekvation 16 nedan (3).

$$M_x = 5 + 5 \cdot \frac{R-X}{R-G_{min}} \text{ för } X < R$$

*Ekvation 16*

$$M_x = 5 + 5 \cdot \frac{R-X}{G_{max}-R} \text{ för } X > R$$

Lägre värden relativt referensvärdet ger bättre relativ skärbarhet.

---

## 3 Litteraturstudie

### 3.1 Koppar

#### 3.1.1 Introduktion

Ren koppar, som är av sorten syrefri (oxygenfree copper, OFC), är ett av de tuffaste materialen att bearbeta bland de olika kopparlegeringarna och rent allmänt. Utgår man från kopparlegeringarna kan man dela in dessa grovt i tre olika grupper med avseende på skärbarheten. OFC placeras i grupp 3 på grund av sina duktila egenskaper, vilket gör materialet långspånigt. De mekaniska egenskaperna gör även att materialet genererar höga temperaturer och spänningar på skärverktyget. Material i denna grupp kan bearbetas med samma teknik som ferritiska material och med lägre hastigheter än grupp 1 och 2. Skärbarheten för de olika grupperna är baserade på mässing av typen CZ121 med 3 % Pb som referens (100 %) och grupp 3 har skärbarhet < 30 %, grupp 2 har skärbarhet mellan 30 – 60 % samt grupp 1 har upp till 150 % i skärbarhet.

Grupp 1 omfattar de lättbearbetade materialen som är kopparlegeringar innehållande bly, tellurium och svavel. Grupp 2 innehåller legeringar med bättre mekaniska egenskaper genom exempel kallbearbetning men som ger tuffare bearbetning på grund av exempel längre spånor. Grupp 3 omfattar två huvudgrupper, som båda ger långa och sega spånor. Där första gruppen innehåller legeringar med homogen struktur och utmärkta kallbearbetningsegenskaper och måttligt bra varmbearbetningsegenskaper. Den andra huvudgruppen innehåller de legeringar med heterogena strukturerna med sämre kallbearbetningsegenskaper och bra varmbearbetningsegenskaper.

Det finns många faktorer som spelar in på skärbarheten som till exempel materialval, verktygsgeometri, skärdata och skärvätska med flera. Tillvägagångssätt för att få optimala skärdata är att börja med antagna skär- och matningshastigheter, tillsammans med spån- och släppningsvinklar vilka sedan kan varieras för att uppnå den optimala lösningen relativt materialets struktur och komposition, maskinens karakteristik samt skärdjup och skärvätska.

Man kan förbättra skärbarheten genom att använda sig av specialtekniker som till exempel att använda spånbrutargeometri i skärverktyget. Just detta exempel gör bearbetning av koppar med hög konduktivitet enklare att bearbeta (4).

#### 3.1.2 Spånbildning och spånformning

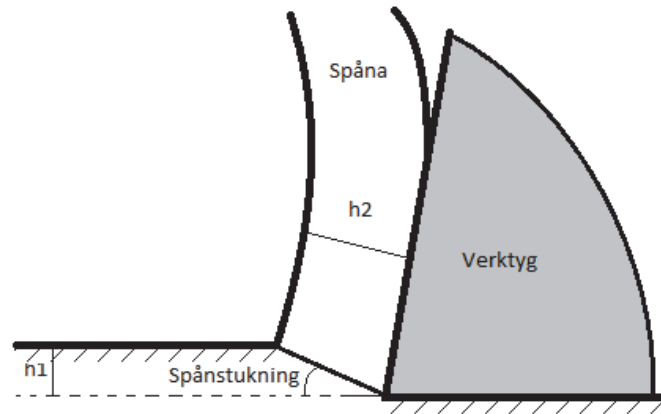
Problemet med OFC ligger i att kopparn är mycket duktil vilket medför att spånan vid skärande bearbetning blir lång och kontinuerlig. Detta leder till trassel som kan skada arbetstycket och maskin.

Valet av spånvinkel har stor betydelse för spånbildningen. Vid stora spånvinklar fås ett spetsigare skär som lättare kan skära och sänka skärkrafterna. Vid små spånvinklar mindre än 45° bildas det tomrum på spånans undersida när OFC bearbetas (5). Med en hög spånvinkel förhindras att deformation sker framför skärverktyget, detta leder till att ytan och spånan blir finare men samtidigt bildas en lång enhetlig spåna som gör det svårare att bearbeta materialet (6).

Åtgärd: Välja skär med god spånbrutning, rikta spånan bort från arbetsstycket (spiralformad) eller försöka bryta spånan mot verktyget (5). Vid skärande bearbetning av koppar uppstår det ett skjuvplan

---

med låg skjuvplansvinkel. Spånstukningen är relativt stor, den teoretiska spåntjockleken ( $h_1$ ) är mindre än den verkliga ( $h_2$ ) se Figur 8, vilket resulterar i en lägre hastighet av spån­hastigheten (7).



Figur 8 Spån­blidning.

### 3.1.3 Skärkrafter

När spån­vinkel är liten blir det en större kontaktyta längs verktyget, detta leder till tjockare spånor samt större matnings och skärkrafter. Med en högre spån­vinkel minskar krafterna, även vid ökad skärhastighet minskar krafterna främst vid lägre spån­vinkel. Med en spån­vinkel på  $6^\circ$  varierar huvudskärkraften mellan 720-900 N beroende på skärhastigheten, med en spån­vinkel på  $25^\circ$  ligger huvudskärkraften på cirka 380 N och för  $45^\circ$  ligger skärkraften på cirka 280 N. Tester utfördes på två olika sorters OFC ett med hårdhet 100 HV och ett med 50 HV, tabellerna i Bilaga 1 visar värdena som användes och uppmättes för kopparn med hårdhet 50 HV. Krafterna för de båda kopparmaterialen är relativt lika, den största skillnaden är för en spån­vinkel på  $25^\circ$  och en matningshastighet över 200 m/min då krafterna för den hårdare kopparn är högre. Skärdata som användes i experimentet summeras i Bilaga 1, ett M42 HSS verktyg användes vid svarvningen (6).

### 3.1.4 Aktuella materialgrupper och dess ISO-indelning

Oxidfri koppar brukar delas in i två olika varianter Oxygen Free Copper Electrolytic (OFCE) C10100 (CW009A) och OFC C10200 (CW008A). C10100 innehåller 99.99% koppar medan C10200 innehåller 99.95 % koppar. Kopparn som används till kaviteterna i accelerationsmodulerna till HIE-Isolde har den Europeiska standardbeteckningen CW009A EN 13604 motsvarande beteckning i USA är UNS C10100 Grade 1 ASTM B 170.

I den Europeiska standarden EN 13604 kan man utläsa information som sammansättning, krav på olika material egenskaper samt toleranser för olika dimensioner för två olika sorters koppar CW009A och CW022A. Dessa används i elektronik- och halvledarutrustning samt för vakuum applikationer i form av plåt, band, sömlösa rör, stänger, tråd och olika profiler. Här finns även information om vilka testmetoder som användes för att kunna kontrollera om materialet överensstämmer med kraven i standarden och även leveransvillkor anges. I beteckningen CW009A anger C att materialet består av koppar, W betyder att materialet är smitt, 009 betyder att materialet är i princip ren koppar dvs. kopparn innehåller inga legeringsämnen och sista bokstaven A står för gruppen ren koppar som sträcker sig från nummer 000-099 (8).



---

I den amerikanska standarden ASTM B 170 kan man utläsa specifikationerna för grad 1 UNS C10100 och grad 2 UNS C10200 oxidfri koppar i form av till exempel tråd, profiler och stänger. Man hittar information om sammansättningen och krav på olika testmetoder som kopparn ska klara av (9).

### 3.1.5 Bearbetning av koppar

Bearbetbarheten kan definieras som hur mycket energi som krävs för att bearbeta materialet, verktygsförslitning, ytfinhet, spånformning eller kombinationer av de olika parameterna. Materialens olika egenskaper har även betydelse för bearbetbarheten, hårda och sköra material är generellt svårare att bearbeta än mjuka och duktila material. Bearbetbarheten påverkas även av vilket material verktyget består av och dess geometri, om och vilken skärvätska som används och personalens erfarenhet som sköter maskinen.

Bearbetbarheten för de olika kopparmaterialen som ingår i grupp tre kan relateras till:

*Hårdheten.* Mjukare material kräver generellt mindre energi än hårda material vid bearbetning och sliter även mindre på verktyget. Mjuka material skadas lättare av verktyget vilket leder till att ytfinheten påverkas negativt och gropar kan uppstå i materialet. Hårda material kan skada verktyget och slita loss det mjukare matrismaterialet i verktyget vilket leder till sämre ytfinhet.

*Spånformerna.* Koppar i grupp tre bildar längre spånor vilket gör det svårt att använda materialen vid automatiserade maskiner som ger en högre produktionstakt eftersom spånorna trasslar in sig och problem uppstår.

*Strukturen.* Vid varm- och kallbearbetning deformerar kornen eller korngränserna och förlängs i deformationsriktningen. Bearbetbarheten förbättras om man bearbetar materialet i motsatt deformationsriktning (10).

Koppar har mycket god elektrisk och termisk konduktivitet samt hög duktilitet, detta är några av anledningarna till att man använder koppar i många av dagens produkter.

De mekaniska egenskaperna för koppar kan förbättras genom bl.a. kallbearbetning eller olika legeringsämnen. Genom kallbearbetning ökar man dislokationstätheten, men detta påverkar bara den elektriska och termiska konduktiviteten marginellt vid rumstemperatur. Den elektriska konduktiviteten är oberoende av kristallstrukturen lägesriktning och varierar mycket lite beroende på kornstorleken (11).

#### 3.1.5.1 Härdning av OFC

Den enda metoden som man kan använda för att härda OFC är genom deformationshärdning detta görs genom kallbearbetning som till exempel valsning eller dragning. Styrkan, hårdheten och fjädringsförmågan ökar medan duktiliteten minskar. Den elektriska ledningsförmågan minskar marginellt, för att få tillbaka den elektriska ledningsförmågan kan man glödga materialet men då går man miste om effekten av kallbearbetningen.

#### 3.1.5.2 Värmebehandling

Glödning tillämpas för att öka segheten genom att man värmer upp materialet och sedan låter det svalna av långsamt eller att snabbt släcka materialet. Genom att avspänningsglödga materialet mellan 150-200 °C kan man få spänningarna att släppa inom materialet som uppkommit efter bearbetning.

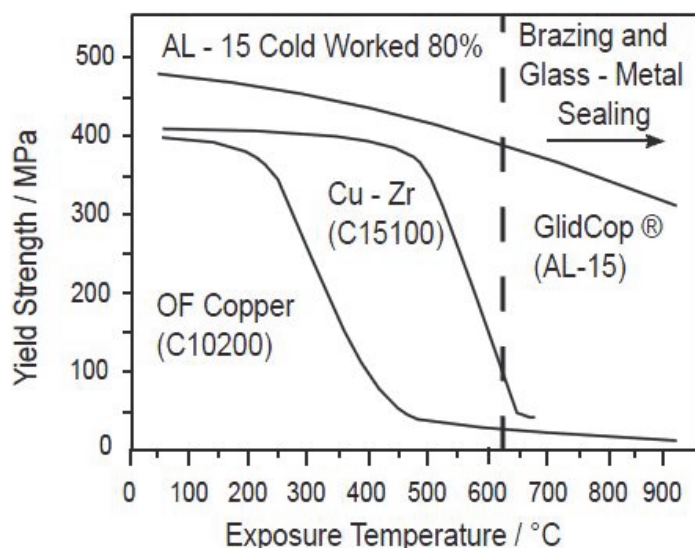
---

Beroende på vilken temperatur (200-600 °C) man värmer upp materialet till kan man styra storleken på kornen i materialet (12).

### 3.1.5.3 Legeringsämne för OFC

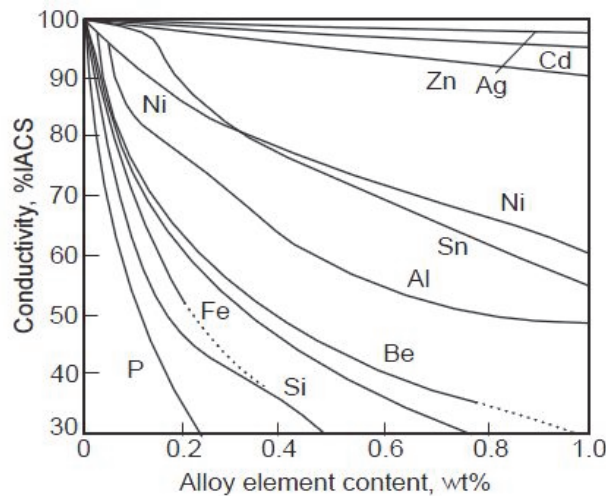
För att förbättra de mekaniska egenskaperna av oxidfri koppar kan man legera kopparn med små mängder av till exempel zirkonium (0.05 w% - 0.15 w%) genom lösningshärdning och urskilningshärdning. Ännu bättre egenskaper får man om man legerar kopparn med små mängder aluminium. Kallbearbetat oxidfri koppar mjuknar vid runt 300 °C medan koppar zirkonium legeringen mjuknar vid runt 550 °C, se Figur 9 (10).

För att förbättra bearbetbarheten för OFC kan man tillsätta till exempel 0,3 % svavel. Tillsatsen påverkar inte den elektriska konduktiviteten i någon större grad men genom svavel minskar man på de krafter som verktyget utsätts för framförallt vid lägre skärhastigheter och temperaturen i verktyget sjunker vid högre hastigheter. Storleken på spånorna minskar och de bryts av lättare vid skjuvplanet. Detta leder till att man får en finare yta på materialet då friktionskrafterna mellan verktyg och spåna minskar och att skärverktygets livslängd förlängs (7).



Figur 9 Visar hur sträckgränsen varierar med olika legeringsämnen för koppar (10).

Om man legerar koppar sjunker den elektriska konduktiviteten vilket i vissa fall inte är önskvärt beroende på vilken applikation kopparn ska användas till. Även om man legerar kopparn med silver som har högre elektrisk konduktivitet än kopparn, tappar kopparlegeringen i elektrisk konduktivitet, se Figur 10.



Figur 10 Diagram över hur elektriska konduktiviteten avtar för kopparslegeringar med olika legeringsämnen (10).

### 3.1.6 Efterbearbetning

Det finns ett antal metoder man kan använda sig av för att få önskad ytfinhet på kopparslegeringar efter att den bearbetats i en svarv eller fräs. Kaviteterna som används till acceleratormoduler till projektet HIE-Isolde har en ytfinhet som finast  $R_a$  0,8  $\mu\text{m}$ . För att få den rätta ytfinheten på kaviteterna använder man på CERN kemisk etsning kallad SUBU som etsningsvätska vid en temperatur av 72 °C. SUBU är en blandning av sulfaminsyra, väteperoxid, n-butanol och ammonium citrat. Efteråt tvättar man av materialet med utspädd sulfaminsyra (13). Bättre ytfinhet kan även uppnås med precisionsfräsning med ett enkristall diamantskärverktyg där man avverkar ytan i olika lager som minskar efterhand till ett fåtal mikrometer i det sista avverkade lagret, ytfinhet på 1-4 nm kan uppnås (14). Andra sätt för att uppnå finare yta är genom slipning, hening, läppning, polering och elektrokemisk slipning/hening.

### 3.1.7 Skärdata

Vid skärande bearbetning av koppar lämpar det sig bäst att använda så stor spånvinkel ( $\gamma$ ) som möjligt. Fördelen är att skärkrafterna blir lägre som har en stor påverkan på ytfinheten.

Konsekvensen av att ha en stor spånvinkel resulterar i en mindre eggvinkel ( $\beta$ ) vilket kommer att ge ett mindre stabilt verktygsutförande (5). Allt eftersom skärdjupet reduceras kommer det specifika skärmotståndet, som är huvudskärkraften dividerad med skärytans area ( $bh$ ), att öka medan den radially tryckkraften hålls i princip konstant (15).

#### 3.1.7.1 Svarvning

Vid svarvning kan man använda sig av olika kombinationer av skärdata för att uppnå bästa resultat både kvalitets- och kostnadsmässigt. Något som är gemensamt för kopparlegeringarna är att börja med höga skärhastigheter, låga matningar och normala till små skärdjup.

Vid bearbetning av mindre svarvstycken är det rekommenderat att köra med den högsta möjliga skärhastigheten på spindeln och anpassa matningen till skärdjupet, maskineffekten, skärvätska och ytfinhet. För större svarvstycken är det bättre att bearbeta med en låg skärhastighet då det inte är praktiskt möjligt att ha för hög spindelhastighet.

---

Ska man utnyttja hårdmetallen effektivast bör låg matning användas och relativt stora skärdjup tillsammans med den högsta skärhastigheten som uppfyller önskad livslängd på verktyget (4).

I tabellerna i Bilaga 3 finns rekommenderad skärdata för OFC koppar från olika källor. Ett tillvägagångssätt för användning av tabellen är att börja med att ta halva skärdjupsintervallet, det mittersta värdet, och sedan justera skärhastigheten upp eller ner för att få bästa tänkbara resultat.

När val av spånvinkel ska göras behövs vetskap om arbetsmaterialets karaktär. Vid bearbetning av mindre duktila kopparlegeringar bör en liten eller ingen spånvinkel väljas. De mer duktila kopparlegeringarna kan dra fördel av att välja en större spånvinkel. Då undviks löseggsbildningen framme vid skäregget utav deformerat arbetsmaterial. Nackdelar med större lutning är dock att spånbrytningen försämras och underlättar för kontinuerliga spånor (4). När man bearbetar OFC med större vinklar finns det risk för att verktyget ”tvingas” in i materialet vilket leder till sämre ytfinhet. Ett sätt för att minska friktionen och temperaturen i arbetstycket är att polera upp ytan före bearbetning. Genom att polera ytan på verktyget minskar man även risken för att material ska fastna och byggas upp på verktyget som senare slits av och kan försämra ytfinishen på arbetsstycket (10).

Vid för stora nosradier eller för små ställvinklar kan detta leda till vibrationer i systemet. När det kommer till lätt finbearbetning, där normal skärhastighet och grov matning används, är det en fördel att ha så små ställvinklar som möjligt (4). I Bilaga 3 tas olika verktygsvinklar och bearbetningsvinklar upp som är lämpliga för bearbetning av OFC.

För grupp 3 innehållande långspåniga kopparlegeringar kan en god utformad spånbrytare av skärverktyget göra stor nytta. Genom att förändra geometrin på skärytan som att lägga till en barrikad för att stoppa spånans utbredning kan denna ändra spånans och förhoppningsvis bryta den. En lämplig form av spånbrytaren är att få spånans att inte återgå till ett kontinuerligt platt band (4).

#### *3.1.7.2 Fräsning*

Vid intermittent bearbetning, som fräsning, slipper man de kontinuerliga spånorna eftersom dessa begränsas av ingreppssträckan (4).

Vid användande av spiralfräsverktyg vid fräsning av grupp tre koppar kan man använda sig av verktyg med en spiralvinkel av 53°. Spånvinkeln och släppningsvinkeln för plan-, skiv- och pinnfräs bör ligga på 0-15° respektive 5-15°. Även här bör man polera verktyget eller använda sig av skär med beläggning för att minska belastningen på verktyget. Skärhastigheten bör ligga på 15-45 m/min och matningshastigheten på 0.18-0.76 mm/varv beroende på typ av skärverktyg.

#### *3.1.7.3 Borrning*

För kopparlegeringar i grupp tre bör man använda maximal spånvinkel. Spiralvinkeln ska vara mellan 100-110° och släppvinkeln mellan 12-20°. Genom att göra ett hack eller en skåra på skärningsytan på borret underlättar man att bryta av spånorna. Vid borrning av mindre hål bör man använda maximal spindelhastighet, matningshastigheten varierar mellan 0.05-0.76 mm/varv beroende på koppertyp där man bör välja en lägre matningshastighet för koppar i grupp tre (10).

### **3.1.8 Skärvätska**

När man bearbetar koppar med hårdmetall kan man göra detta utan skärvätska men det skadar inte att använda för att undvika överhettning och då bör en vattenbaserad skärvätska användas framför ren olja. Att använda skärvätska kommer även att förbättra ytfinheten och toleranserna samt kan man öka

---

skärhastigheten, matningen och produktiviteten. Skärverktygets livslängd kommer även att förlängas. Vid fräsning kan man inte använda en skärvätska som smörjer alltför mycket då det finns risk att skärelegarna glider över arbetsytan vid ingreppet. För grupp 3 gäller det att smörja framför att kyla (4).

### 3.1.9 Verktygsmaterial

Att välja rätt verktygsmaterial för att bearbeta koppar är inte alltid lätt för att det beror av flera olika faktorer. Valet beror av hur lång ingreppstid man har och hur lång livslängd man vill åstadkomma på verktyget, vilka toleranskrav man har för arbetsstycket, hur stilleståndstiden påverkas av verktygsvalet samt kostnaden för verktygsbyte och själva kostnaden av skärverktyget. Allt detta bör uppmärksammas vid valet av skärverktyg.

De mest vanliga skärverktygsmaterialen för att bearbeta kopparlegeringar är idag:

- Snabbstål (HSS)
- Hårdmetall (HM)
- Diamant (enkristall och PCD)

Keramiska och cermet verktyg är inte vanliga vid bearbetning av kopparlegeringar.

När ska man då använda en viss typ av verktygsmaterial? Det beror som sagt mycket på ovanstående faktorer men nedan beskrivs egenskaperna för varje verktygsmaterial.

#### 3.1.9.1 Snabbstål

Snabbstål kan användas vid flera operationer, oftast med korta ingrepp, där speciella former ska åstadkommas. Materialet är billigt och går att slipa till igen. Vid bearbetning används normala skärhastigheter till de flesta kopparlegeringar eftersom det inte genereras så höga temperaturer vid bearbetningsprocessen.

#### 3.1.9.2 Hårdmetall

Dessa skär är populära på grund av sin bredd i form av flera olika kvalitéer och geometrier. Verktygsinställningen går fort och har lång livslängd. Det händer ofta att man får byta verktyg oftare efter haveri än efter förslitning. När man talar om skärverktyg som dessa är det vanligast att man använder sintrad volframkarbid- och koboltpulver (bindemedel). När bearbetning sker med hårdmetallskär bör man köra med skärhastigheter så att temperaturen blir hög nog för att undvika löseggsbildning. De är dessutom också känsliga mot spänningsvariationer och slag varav man vill undvika lösegg. Vid för låga skärhastigheter fås problem med lösegg vilket nöter på skäreget och sliter ut detta i förtid. Man kan inte uppnå hur höga processtemperaturer som helst utan det finns några faktorer som begränsar temperaturstegringen:

- Fastspänningsanordningen och dess stabilitet
- Effekten på spindeln
- Värmebildningen för vissa material som ren koppar (grupp 3)
- Spånbildningen och spånavverkningen
- Bullerkraven

- 
- Säkerhetsaspekter

När det kommer till bearbetning av kopparlegeringar bör man inte använda belagda hårdmetallskär. Man brukar belägga skärverktygen för att uppnå bättre förslitningsmotstånd, vilket fungerar för aluminium brons men inte för övriga kopparlegeringar. Varför det inte är till någon fördel beror på att kopparlegeringarna inte är kemiskt aggressiva på hårdmetallen av volframkarbid.

Det finns tre huvudkategorier av hårdmetallsmaterial, enligt ISO 513:

- P för långspånadematerial
- K för kortspånadematerial
- M för material mellan P och K

Kategori K är material enbart innehållande volframkarbider, men ibland kan den även innehålla små mängder av tantal- och titankarbider. Kategori P och M innehåller större mängd av tantal- och titankarbider men som sagt har detta liten inverkan på bearbetningen av koppar. Man bör välja K kategorin trots den är för kortspånadematerial och kopparlegeringarna är långspånade.

Kategorierna är sedan uppdelade i gradnummer där ett högt värde innebär större matningshastigheter medan lägre ger större skärhastigheter. Numreringen står för hur kornstorleken ser ut där ett högt värde (K40) innebär stora korn och mycket bindemedel, vilket ger segare skär men som är mindre tåliga för slitage. Lägre värden (K10) har mindre korn som ger hårdare skär.

När det kommer till att välja verktygsmaterial för bearbetning av koppar rekommenderas det att man väljer K10 vid svarvning och K20 för fräsning (intermittent). Även K40 och M40 går att använda då det innefattar svårare arbetsmaterial och där P01 samt P05 används för finbearbetning med hög hastighet.

### 3.1.9.3 *Diamant*

Om det finns ett stort krav på ytfinhet och toleranser ska man försöka använda enkristall diamantskär annars är det inte nödvändigt att använda denna typ av skär. Bearbetning av den här typen av skär görs med höga skärhastigheter och små skärdjup utan tillsats av skärvätska. Man bör dock se upp så att inte diamanten går sönder.

Skärverktyg gjorda av polykristallin diamant (PCD) har lång livslängd vid jämförelse av hårdmetaller där livslängden kan vara upp mot 500 gånger den för hårdmetallen. Det är möjligt att tjäna in pengar på att minska stilleståndtiden. Dess höga förslitningsmotstånd gör att toleranserna bibehålls även under längre bearbetningsprocesser (4).

Något som gäller för all typ av bearbetning med diamant är att inte åstadkomma temperaturer över 600°C för att undvika nedbrytning av diamant till grafit. PCD är sprött och det gäller att maskinen är stabil och att höga skärhastigheter används med låga matningar och skärdjup för att undvika stötar. Skärvätska går att använda för kylning. Ett kletigt material är inga större problem eftersom diamanten är kemiskt stabil (16).

---

## 3.2 Niob

### 3.2.1 Introduktion

Niob tillhör gruppen övergångsmetallerna och är en mjuk och ovanlig metall som främst används som legeringsämne i höghållfasthetsstål. Det räcker med små mängder niob, 63 gram per ton för att få bättre egenskaper på höghållfasthetsstål. Några av egenskaperna är till exempel högre hållfasthet, bättre korrosionsbeständighet och lättare konstruktioner eftersom mindre stål behövs i konstruktionerna. Inom till exempel bilindustrin leder en tillsats av niob på \$9 till en viktreduktion på 100 kg per bil. Den största delen av produktionen av niob återfinns i Brasilien som står för cirka 91 % av den totala produktionen av niob, Kanada står för cirka 8 % och Australien har en liten produktion på cirka 1 % (17). Niob är likt oxidfri koppar när det kommer till att bearbeta materialet. Niob har hög duktilitet och det produceras långa spånor som är svåra att få bort under tillverkningen. Det är viktigt att använda rätt skärhastighet och skärvätska för att materialet inte ska överhettas (18).

### 3.2.2 Val av verktyg

Vid svarvning eller fräsning kan man använda snabbstål eller hårdmetallskär. Hårdmetallskären har en tendens att skava på arbetstycket, spånorna måste glida av verktygsytan annars finns det risk för att spånorna samlas och bygger upp på verktyget som då riskerar att gå i sönder. Materialet ska avverkas genom skjuvning därför är det viktigt att använda ythastighet på minst 24 m/min annars finns det risk för att materialet slits av, speciellt om materialet är värmebehandlat (19). Det är viktigt att använda stor positiv spånvinkel för att reducera risken för kraterbildning eller slipningseffekt på verktyget (20). Vid användande av hårdmetallskär bör man undvika att använda spånbrytare, eventuell beläggning bör vara så tunn som möjligt eftersom varje lager av beläggning gör att skärytan inte blir lika skarp vilket gör det svårare att svarva i materialet. Normala hårdmetallskär som används för att bearbeta aluminium har visat sig fungera tillfredställande samtidigt som de är mest kostnadseffektiva (21).

### 3.2.3 Borrning

Standard höghastighetsborr används för att borra i niob och dess legeringar. Det är nödvändigt att man kollar styrlisten ofta efter förslitningar för att undvika att hålen blir mindre än vad de ursprungligen skulle bli (20).

### 3.2.4 Skärvätska

Flera olika sorters skärvätska eller smörjmedel förekommer, det vanligaste är någon slags oljelösning men det förekommer även, vatten, freon och luft (18) (19) (20) (22) (23). Silikonbaserad olja bör undvikas om ren yta eftersträvas eftersom det är svårt att tvätta bort i efterhand. Kolvätebaserad skärvätska som till exempel etanol eller vattenlöslig kolvätelösning är att föredra eftersom de är lättare att tvätta bort i efterhand. Smörjmedel som grafit och  $\text{MoS}_2$  bör även undvikas eftersom de kan vara svåra att få bort (23). Vid fräsning är det lämpligt att välja en vattenlöslig skärolja som innehåller svavel eller klor (20).

### 3.2.5 Svetsning

För att undvika att niob blir sprödare, kan man endast värma eller smälta det i vakuum eller i en atmosfär av ren inert gas. De tekniker som man använder sig av är elektronstråle- eller TIG-svetsning

---

(18). Niob är en väldigt reaktiv metall och reagerar med alla de vanliga gaserna som väte-, kväve-, syrgas, kolmonoxid och koldioxid. Niob reagerar även med ytföroreningar som olja, fett, avfettningsslösningar och rester från rengöringslösningar som aceton vid uppvärmning. Därför måste ytan vara helt ren innan det går att svetsa i materialet (19).

Att rengöra Niob kan man göra genom följande steg:

- Avfetta.
- Sänka ner i ett bad av alkalisk rengöring i 5-10 minuter.
- Skölja av med vatten.
- Sänka ner i 35-40% HNO<sub>3</sub> i 2-5 minuter vid rumstemperatur.
- Skölja av med kranvatten och efter det med destillerat vatten.
- Torka materialet genom att blåsa av det (22).

Att TIG-svetsa niob är komplicerat eftersom det är viktigt att atmosfären runt om den smälta och värmepåverkade zonen antingen befinner sig i vacuum eller är täckt av argon eller en mix av argon och helium. Den sammansmälta zonen måste skyddas från exponering av luft till dess att den har svalnat till under 260 °C både på fram och baksidan (19).

Niob och dess legeringar har ett utmärkt skydd mot korrosiva miljöer som till exempel mineralsyror, de flesta organiska syror, flytande metaller, de flesta salter och vissa fluorföreningsslösningar vilket är unikt för de reaktiva metallerna (22).

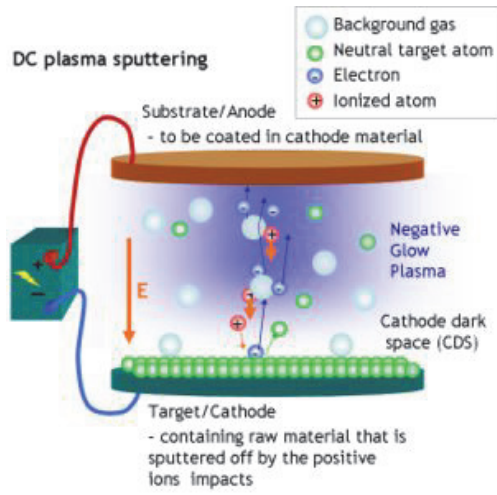
### **3.2.6 Säkerhet och risker**

Niob är icke toxiskt. Små partiklar eller pulver av niob som är mindre än 5 µm kan självantända i rumstemperatur. Vid brand är det viktigt att inte försöka släcka med vatten, det kan resultera i en explosion. Istället ska man låta elden brinna ut, använda en typ D brandsläckare med pulver eller släcka med torrt salt (20).

## **3.3 Sputtring**

Sputtring är en teknik som används för att belägga en yta med en tunn film av ett visst material. Det finns flera olika sätt att sputtra ett material till exempel DC-sputtring, RF-sputtring (radiofrekvens) eller magnet-sputtring. Principen vid sputtring är att materialet som ska beläggas fungerar som anod och placeras i en vakuumbehållare tillsammans med sputtringsmaterialet som fungerar som katod. Behållaren fylls med argongas som övergår till ett plasmatillstånd när man kopplar till en likströmskälla. Den positiva argonjonen krockar med sputtringsmaterialet i hög hastighet vilket frigör sputtringsmaterial som sedan belägger anodmaterialet se Figur 11 (24).





*Figur 11 Illustrerar sputtring av ett ämne.*

---

---

## 4 Konstruktionsanalys

### 4.1 Bakgrund till konstruktionsanalys

En konstruktionsanalys har gjorts för kaviteten där begrepp som funktionsstyrande och produktionskritisk operation introducerades. Med funktionsstyrande menas en operation eller detalj på en komponent som är kritisk för att den ska fungera som det är tänkt. Det kan vara ett gängat hål som det ska monteras en annan detalj på eller en tolerans som krävs för att komponenten ska passa ihop med en annan komponent.

En produktionskritisk operation är en operation som gör en detalj, kanske inte omöjlig men svårare att tillverka. Det kan vara en tolerans eller en ytfinhet som är svår att uppnå eller form som gör detaljen svår att tillverka.

I de accelerationsmoduler som ska tillverkas till CERN ingår det ett antal olika komponenter med varierande svårighetsgrad vad gällande tillverkning. I en accelerationsmodul ingår det fem kaviteter som ska tillverkas i OFC som är en av de mer komplexa detaljerna att tillverka. I följande ritningsgranskning har vi valt att koncentrera oss på kaviteterna och den detaljen som ska svetsas på kaviteten. Detta beror dels på att detaljerna ska tillverkas av OFC som vi har utfört experiment på men även att dessa detaljer har kommit så pass långt i utvecklingen att de snart är redo för tillverkning.

Vi började ritningsgranskningen med att lista vilka tillverkningsprocesser som ingår vid tillverkningen av en detalj, i vårt fall blev det tre olika tillverkningsprocesser:

- Svarvning
- Fräsning
- Borrning/gängning

Därefter listas de olika operationerna och delas in för respektive tillverkningsprocess. För varje operation noteras om den har tolerans- eller ytfinhetskrav. Alla operationer listas om de har ett funktionskrav eller om det är produktionskritiskt. I första steget sätter vi vad vi själva tror är funktionskrav och vad som är produktionskritiskt. För att sedan kunna gå vidare med vilka operationer som är ett funktionskrav eller produktionskritiska utfördes intervjuer med personer som har kunskap om hur kaviteten är konstruerad och dess funktion samt intervjuer med produktionsföretag och verkstadspersonal.

### 4.2 OFC Kaviteten

Utgångsmaterialet till kaviteten levereras som en stor cylinder där avverkningen sedan främst sker genom svarvande bearbetning. Kaviteten ska ha en generell yttolerans på  $R_a$  1.6 förutom på insidan där ytfinheten ska vara  $R_a$  0.8. Insidan ska sputtras med ett tunt skikt niob för att bli supraledande. Om ytfinhetskravet inte uppnås finns det senare risk för överhettning och haveri av kaviteten när accelerationsprocessen sätter igång. Anledningen till att kaviteten har en generell tolerans på  $R_a$  1.6 är att inuti och runt om kaviteten ska det vara vakuum på  $10^{-10}$  Torr. Om ytfinhetskravet inte uppnås kan

---

det bli svårt att uppnå det satta kravet för vakuum då högre vakuum kräver bättre ytfinhet annars finns det risk för utgasning av syre. En av de svåraste operationerna att utföra på kaviteten är fräsa ur de två kullarna på insidan av kaviteten där partiklarna accelereras. Dels beror detta på svårigheten att komma åt då specialverktyg krävs men också på de toleranser som måste uppnås.

Den cylinder eller stång som ska elektronstrålesvetsas ihop med kaviteten tillverkas även den främst genom svarvande bearbetning. Detaljen har ytfinhetskravet  $R_a$  0.8 av samma anledning som för kraven för ytfinhet på insidan på kaviteten. Ett av de mer svårare men väldigt viktiga ytformhetskraven är de för accelerationskanalen, att hålen som går igenom kaviteten och cylindern ligger rätt i position i förhållande till varandra. Det kan uppstå stora problem i accelerationsprocessen om partiklarna skulle stöta på eventuella motstånd på grund av att hålen inte är linjerade. Bearbetningen av den operationen kräver stor noggrannhet och kontrollmätningar för att uppnå de givna toleranserna.

### 4.3 Systematisk utvecklingsmetod

För att kunna genomföra förändringar i konstruktionen som leder fram till förbättringar i produktionen krävs en systematisk utvecklingsmetod. Det är en metod som går igenom varje operation och kategoriserar dessa i olika tillverkningsmetoder.

Exempel:      1.(...) = Svarvning  
                  2.(...) = Fräsning  
                  3.(...) = Borrning

*Tabell 1 Exempel på olika uppdelade tillverkningsoperationer av en detalj.*

ISLACSCB0076	Operation
	1.1 Yttersvarvning av mindre diametern
	1.2 Yttersvarvning av större diametern
	1.3 Plansvarvning av toppen
	1.4 Innersvarvning (planförsänkning av hål)
	2.1 Fräsning av acceleratorkanal och dess radie
	2.2 Fräsning av 2 spår
	3.1 Borrning av acceleratorkanalen
	3.2 Borrning av kylkanal

Tillverkningsmetoderna för respektive komponent (ISLACSCB0076, CANNE CENTRALE) beskrivs också i ord för att lättare förstå vad det handlar om, se Tabell 1.

Vidare efter att alla operationer har delats upp ska en mer ingående fördjupning av operationerna göras avseende dimensioner, toleranser o.s.v. se Tabell 2.

Tabell 2 Exempel på detaljerade krav för en detalj.

<b>Operation</b>	<b>Dimension</b>	<b>Tolerans</b>	<b>Ytfinhet</b>
1.1	se ritning	ISO 2768-fH	0.8
1.2	se ritning	k5	0.8 (1.6)
1.3	se ritning	ISO 2768-fH	1.6
1.4	∅76	H8	1.6

(...)

Till slut görs den viktigaste analysen där man kollar om operationen är funktionsstyrande och produktionskritisk. Detta görs för att ta reda på om möjliga konstruktionsförändringar kan underlätta produktionen för de olika operationerna, se Tabell 3.

Tabell 3 Avgör om operationen är funktionsstyrande eller produktionskritisk.

<b>FUNKTIONS- STYRANDE</b>	<b>PRODUKTIONS- KRITISKT</b>	<b>Potentiella problem</b>	<b>Vidare- utveckla</b>	<b>Tillhörighet</b>
JA	NEJ			
JA	JA	Svåra toleranser/lägre produktionshastighet	NEJ	
JA	NEJ			
JA	NEJ			

Tillhör operationen en funktionsstyrande detalj på komponenten visas detta i första kolumnen ovan och innebär att det inte finns mycket utrymme för konstruktionsutveckling. I nästa kolumn beskrivs det om operationen är problematisk vid tillverkning. Ett "JA" där innebär att en förändring borde göras för att förbättra producerbarheten, om så är möjligt. Den sista kolumnen beskriver de potentiella problemen som kan uppkomma om tillverkningen sker enligt nuvarande koncept.

Efter att man lokaliserat de detaljer på komponenten som kan genomgå en konstruktionsförändring för att underlätta produktionen tas de kopplade operationerna till detaljen vidare i en ny systematisk utvecklingsanalys för att där få fram bättre alternativ.

Nedan i Tabell 4 visas ett exempel på hur man går vidare med ett problem och jämför detta med nya förslag. Förslag a är alltid originalutförningen och sätts som referens. De nya förslagen jämförs med referensen och på så vis tilldelas förslagen en viss poäng. Inspiration har hämtats från boken "Product Design and Development" av Ulrich och Eppinger (25).

Tabell 4 Vidareutveckling av koncept.

Problem	Förslag	Producerbarhet	Enkelhet	Hållfasthet	Funktionen	Kostnad	Summa	
1.	a	0	0	0	0	0	0	+ Bättre än referens
	b	+	+	0	?	+	3	0 Referens
								- Sämre än referens

---

Betydelsen av tecknen ovan förklaras i tabellen till höger. Vid eventuellt frågetecken (?) behövs en diskussion med konstruktör/simulerare/beräknare.

Referens och nytt förslag jämförs med varandra i olika kategorier där funktionen väger tyngst, eftersom denna avgör om komponenten kommer att fungera som den ska eller inte. Om funktionen försämras så ska man förkasta nya förslag och behålla originalutformningen.

Tabell 5 Sammanställning av SU:s första steg.

Operation	Canne Centrale (ISLACSC0076)	Dimension	Tolerans	Ytfinhet	FUNKTIONS- STYRANDE	PRODUKTIONS- KRITISKT	Potentiella problem	Vidare- utveckla	Tillhörighet
1.1	Yttersvarvning av mindre diametern	Dimension se ritning	ISO 2768-H	0.8	JA	NEJ			
1.2	Yttersvarvning av större diametern	se ritning	ISO 2768-H	0.8 (1.6)	JA	JA		NEJ	
1.3	Plansvarvning av toppen	se ritning	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ	SVåra toleranser/lågre produktionstakt		
1.4	Innersvarvning (planförslänkning av hål)	ø76	H8	1.6	JA	NEJ			
2.1	Fräsning av acceleratorkanal och dess radie	Pinnfräs (max) ø20	ISO 2768-H	1.6	NEJ	JA	Tar längre tid med flera ingrepp	JA	Acceleratorkanal
2.2	Fräsning av 2 spår	Pinnfräs (max) ø4	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
3.1	Borrning av acceleratorkanalen	ø20	ISO 2768-H	1.6	JA	JA	Tar längre tid med flera ingrepp	JA	Acceleratorkanal
3.2	Borrning av kylkanal	ø70	H8 (liten bit i toppen)	1.6	JA	JA	Dimension och ytfinhet	JA	Kylkanal
3.3	Borrning av hål	ø4	H6	1.6	JA	JA	Toleranser för snäva	NEJ	
3.4	Borrning och gängning av 8 hål	M8	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
Operation	Tube Extérieur (ISLACSC0075)	Dimension	Tolerans	Ytfinhet	FUNKTIONS- STYRANDE	PRODUKTIONS- KRITISKT	Potentiella problem	Vidare- utveckla	Tillhörighet
1.1	Yttersvarvning	se ritning	h8 (vid toppen)	1.6	JA	NEJ			
1.2	Innersvarvning	se ritning	M7	0.8	JA	JA		NEJ	
1.3	Yttersvarvning av spår	se ritning	h7	1.6	NEJ	NEJ	Tunnväggig och ytfinheten		
1.4	Plansvarvning av topp	se ritning	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
1.5	Plansvarvning av botten	se ritning	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
2.1	Fräsning av acceleratorkanal och dess radie x2	Pinnfräs (max) ø20 se ritning	ISO 2768-H	1.6	NEJ	JA	Tar längre tid med flera ingrepp	JA	Acceleratorkanal
2.2	Planförslänkning av acceleratorkanal x2	se ritning	H7 (Rmax0.3)	1.6	JA	NEJ			
2.3	Utfrysning av kullarna från kranzen	se ritning	ISO 2768-H	1.6	NEJ	JA	SVåra geometrier och kräver special verktyg	JA	Acceleratorkanal
2.4	Fräsning av spår på utsidan	0.3 djup se ritning	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
2.5	Fräsning av spår på utsidan	se ritning	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
2.6	Fräsning av styrspår	Pinnfräs (max) ø4	4mm +0.05, -0.1	1.6	JA	NEJ			
3.1	Borrning av 6 st hål	ø10	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
3.2	Borrning och gängning av 4 st hål till infästning	M4	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
3.3	Borrning och gängning av 12 st hål till infästning	M4	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
3.4	Borrning och gängning av 8 st hål till infästning	M4	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
3.5	Borrning och gängning av 4 st hål till infästning	M4	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
3.6	Borrning av acceleratorkanalen	ø20	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			
3.7	Borrning av 2 st hål	ø15	ISO 2768-H	1.6	JA	NEJ			

Tabell 6 Sammanställning av SU:s första steg.

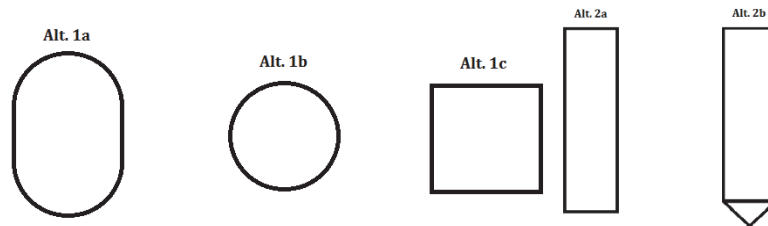
Operation	Transition Tube (ISLACCB0077)	Dimension	Tolerans	Ytfinhet	FUNKTIONS-STYRANDE	PRODUKTIONS-KRITISKT	Potentiella problem	Vidare-utveckla	Tillhörighet
1.1	Yttersvarvning	se ritning	ø72 +0,-0.02	1.6	JA	NEJ			
1.2	Innersvarvning	ø66.3	ISO 2768-FH	1.6	NEJ	NEJ			
1.3	Urfasning av radie	se ritning	1.1 +0.1,+0	1.6	JA	NEJ			
1.4	Yttersvarvning av topp	ø70	H8	1.6	JA	NEJ			
Operation	Flange DN63 (ISLACCB0078)	Dimension	Tolerans	Ytfinhet	FUNKTIONS-STYRANDE	PRODUKTIONS-KRITISKT	Potentiella problem	Vidare-utveckla	Tillhörighet
1.1	Yttersvarvning	ø114	ISO 2768-FH	0.8	NEJ	NEJ			
1.2	Innersvarvning	se ritning	ø72 +0.01,+0.03	0.8	NEJ	NEJ			
2.1	Fräsning av spår	1.5mm	ISO 2768-FH	0.8	NEJ	NEJ			
3.1	Borrning av 8 hål	M10	ISO 2768-FH	-	NEJ	NEJ			
3.2	Borrning av 1 hål	M8	ISO 2768-FH	-	NEJ	NEJ			



---

En SU (Systematisk Utvecklingsmetod) gjordes på kopparkavitetsens fyra komponenter, enligt Tabell 5 och Tabell 6. Där har den systematiska utvecklingsmetoden använts som beskrivits tidigare. Vidare har sedan några kritiska operationer och deras tillhörighet gått för vidareutveckling. I detta steg då nya förslag ska tas fram finns en genomgång nedan på hur man ska gå tillväga.

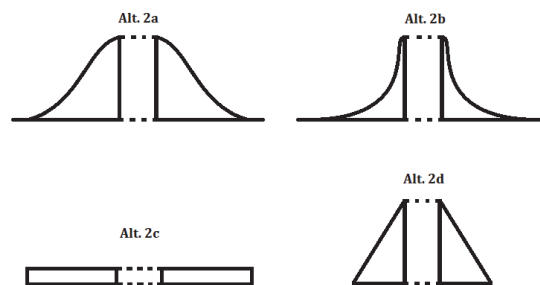
Börja med att ta fram förslag på det tänkta området som behöver genomgå en konstruktionsförändring. Nedan i Figur 12 kan de framtagna förslagen ses för ”Canne centrale”, som är centralröret i mitten av kaviteten.



Figur 12 Konstruktionsförslag.

I den övre delen av Tabell 7 har följande förslag från Figur 12 utvärderats. Utvärderingen sker utifrån en referens som i detta fall är originalutförandet (a). Beroende på hur mycket bättre eller sämre, får det nya förslaget ett + eller – i respektive utvärderingskategori. Dessa summeras sedan och vinnaren blir det förslag med flest poäng.

Den nedre delen av tabell 9 utvärderas förslag från Figur 13, men där förslag 1a-c är desamma som tidigare. De nya förslagen är konstruktionsförbättringar av ”Tube exterieur”, vilket är den yttre delen av kaviteten.



Figur 13 Konstruktionsförslag.

De vinnande förslagen blev för ”Canne centrale” 1b och 2b samt för ”Tube exterieur” blev det 1b och 2c. Eftersom alla vinnande förslag har gett en försämrad funktion, alltså att kaviteten kommer att fungera sämre än tidigare, kommer originalen att användas. Vi ville dock visa att förändringar i konstruktionen är möjliga om en mer grundlig analys av funktionsförändringen görs. För dessa förändringar kommer att leda till besparingar vid produktionen av kaviteten.

Tabell 7 Systematisk vidareutveckling.

Canne Centrale									
Problem	Förslag	Producerbarhet	Enkelhet	Hållfasthet	Funktionen	Kostnad	Summa	Vinnare	
1.	a	0	0	0	0	0	0	0	
	b	+	+	0	-	+	2	X	
	c	-	0	0	-	-	-3		
2.	Förslag		Producerbarhet	Enkelhet	Hållfasthet	Funktionen	Kostnad	Summa	Vinnare
	a	0	0	0	0	0	0	0	
	b	+	+	0	-	+	2	X	

Tube Exterieur									
Problem	Förslag	Producerbarhet	Enkelhet	Hållfasthet	Funktionen	Kostnad	Summa	Vinnare	
1.	a	0	0	0	0	0	0	0	
	b	+	+	0	-	+	2	X	
	c	-	0	0	-	-	-3		
2.	Förslag		Producerbarhet	Enkelhet	Hållfasthet	Funktionen	Kostnad	Summa	Vinnare
	a	0	0	0	0	0	0	0	
	b	-	-	-	-	-	-5		
	c	+	+	-	-	+	1	X	
	d	0	0	0	-	0	-1		

Acceleratorkanal		
1a	original	
1b	runt	
1c	kvadratisk	

Kylkanal		
2a	original	
2b	vanligt borrhål	

Acceleratorkanal		
1a	original	
1b	runt	
1c	kvadratisk	

Kullarna			
2a	original		
2b	tapp		
2c	flat		
2d	kon		

---

## 5 Experiment

### 5.1 Material

#### 5.1.1 Koppar

Koppar köptes in från Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, kopparn kommer från ett lock som har smitts fram, se Bilaga 1. Kopparn har en renhet på 99,99 % med 1 ppm syre, den elektriska konduktiviteten ligger i intervallet 55,2 - 56,1 m/Ω\*mm<sup>2</sup> (95,15 - 96,70 %IACS). Hårdheten uppmättes till ett medelvärde på 14,8 HRB (59 HB), hårdheten varierade allt från 3-30 HRB beroende på var mätningarna utfördes.

#### 5.1.2 Niob

En styck niobstång med dimensionerna Ø70\*450 mm köptes in från Plansee SE, stången har en renhet på 99,7 % Nb.

### 5.2 Förberedelser

Kopparn levererades som två block enligt Figur 14.



*Figur 14 Utgångsmaterial koppar.*

Kopparn sågades i mindre bitar för att senare fräsas och svarvas ut till önskad form. Ur ett kopparblock var det möjligt att ta fram fem stycken kopparcylindrar med mått på cirka 69 mm i diameter och 190 mm i längd. Kopparcylindrarna delades upp i åtta fält om cirka 17 mm genom att avgränsa med stickspår, detta för att lättare kunna avskilja och underlätta analysen av de olika testerna, se Figur 15.



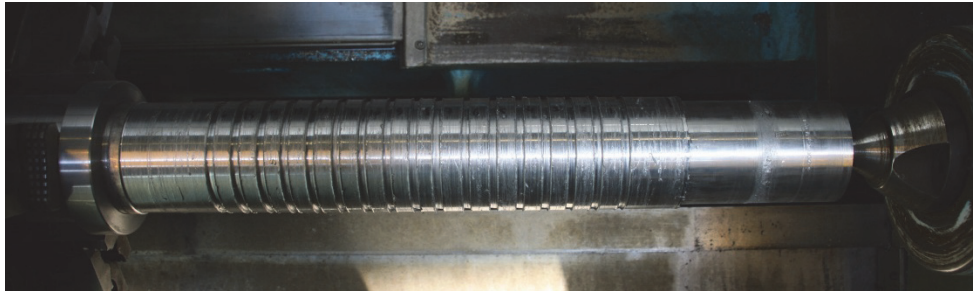
*Figur 15 Kopparcylinder som blivit bearbetad inför tester.*

Den ena änden av kopparcylindern svarvades ut till en viss dimension för att montera en klämhylsa som användes för att montera cylindern i NC-maskinen, se Figur 16.



*Figur 16 Klämhylsa.*

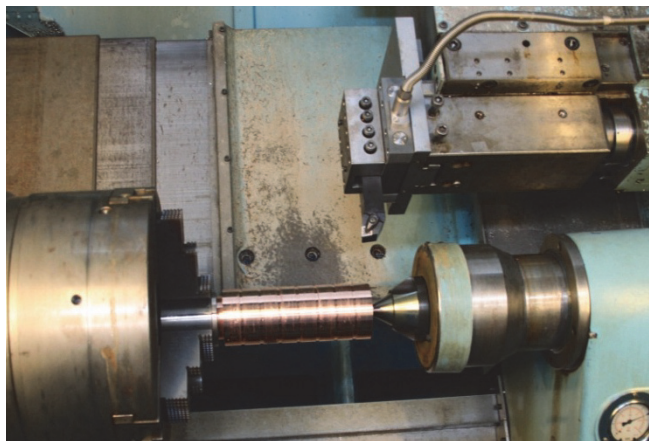
Figur 17 visar niobcylindern uppspänd i svarven och har bearbetats med uppdelade spår inför ytfinhetstesterna.



*Figur 17 Niobcylinder som har bearbetats inför ytfinitetstester.*

## 5.2.1 Utrustning

Maskinerna som användes vid förberedelserna av kopparcylindrarna var en NC-styrd SAJO fräs och en manuell svarv. Vid skärkraftsmätningarna användes en NC-styrd svarv av modell SMT (ST500 CNC 300). Skärkrafterna mäts med en piezoelektrisk skärkraftgivare av märket Kistler 9129-AA, se Figur 18 för uppsättning. En multikanalsförstärkare av märket Kistler 5019B användes för att förstärka signalen som kommer ut från skärkraftgivaren. Förstärkaren har tre kanaler varav tre olika kraftkomponenter registreras ( $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_p$ ). Förstärkaren kopplas till en dator och med programmet National Instruments LabView 7.1 och underprogrammet PTLab2012JZ som registrerar mätvärdena i tre olika grafer beroende på kraftriktningen.



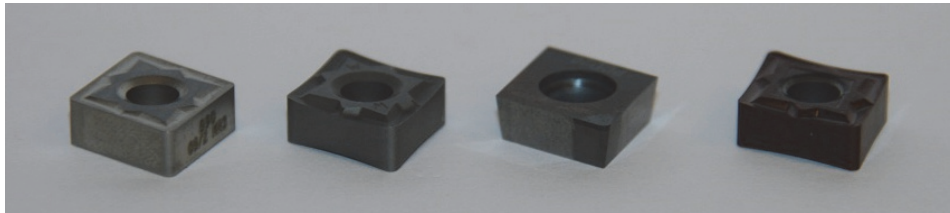
*Figur 18 Koppareylinder uppspänd i svarv.*

## 5.2.2 Verktyg

### 5.2.2.1 Koppar

Fyra olika sorters skärverktyg användes under testerna, alla skären har samma geometri beträffande skärkantlängd, tjocklek och nosradie. Skären som användes vid testerna visas i Figur 19 från vänster till höger:

- 
- Obelagd hårdmetall (HMO), SECO CNMG120408-MR3 890.
  - Obelagd hårdmetall i Wiper utförande SECO CNMG120408W-MF1-P01 890.
  - Diamant (PCD), SECO CCMW120408F-L1 PCD20.
  - TiSiN-TiAlN belagd (HMB), SECO CNMG120408-MF1 TH1000.



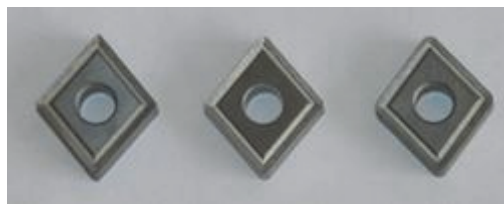
Figur 19 Skären som användes vid OFC- testerna.

Vid svarvtesterna med hårdmetallskär användes verktygshållaren Cororturn RC DCLNL 3225P 12 och med diamantskär användes SECO SCLCL2020K12.

#### 5.2.2.2 Niob

Vid skärtesterna i niob användes obehandlade hårdmetallskär. Geometrin var den samma för skären förutom nosradien där tre olika verktyg användes med nosradier på 0,4, 0,8 och 1,2. Skären som användes visas i Figur 20 från vänster till höger.

- SECO CNMG120404-M1 883.
- SECO CNMG120408-M1 883.
- SECO CNMG120412-M1 883.



Figur 20 Skären som användes vid niob-testerna.

## 5.3 Dragprov

Genom att genomföra dragprover av materialet OFC fås brotttöjningen samt brott- och sträckgränsen. Brotttöjningen erhålls genom mätning av längddifferensen före dragning och efter brott. Brott- och sträckgränsen fås genom att under dragningen insamlas mätdata från kraftpåkänningen och förlängningen. Detta plottas i en graf där spänningen  $\sigma$  (y-led) beror av töjningen  $\varepsilon$  (x-led). Brottgränsen  $\sigma_B = R_m$  erhålls när brott sker av materialet och är då kraften genom tvärsnittsarean. Sträckgränsen  $\sigma_S = R_{p0,2}$  är den spänning som efter avlastning ger en deformation av 0,2 %. Beroende

---

på om det är sann eller teoretisk spänning det talas om erhålls olika gränser. Sann spänning är när man tar hänsyn till ett varierande tvärsnitt medan teoretisk spänning utgår från den ursprungliga tvärsnittsarean. Nedan i Figur 21 ses en dragprovstäv som blivit trådgnistad ut från ett kopparblock.



*Figur 21 Dragprovstäv i koppar.*

## 5.4 Skärdata

### 5.4.1 Koppar

Utifrån de skärdata som är framtagna från litteraturstudien utfördes tester för de olika verktygen i följande intervall.

HMO och Wiper:

Skärhastighet: 90-240 m/min

Matningshastighet: 0.05-0.40 mm/varv

Skärdjup: 0.5 mm

HMB och PCD:

Skärhastighet: 300-800 m/min

Matningshastighet: 0.05-0.20 mm/varv

Skärdjup: 0.2 mm (PCD) 0.5 mm (HMB)

Samma skär- och matningshastighet valdes för båda skären. Anledningen till att skärdjupet skiljer mellan verktygen är att vid de första testerna för HMB med ett skärdjup på 0.2 mm uppstod mycket adhesion på ursprungsmaterialet vilket resulterade i att det inte gick att utföra några ytfinhetsmätningar. Detta undveks genom att öka skärdjupet till 0.5 mm.

### 5.4.2 Niob

Utifrån litteraturstudien togs intervall fram för olika skärdata, se Bilaga 4, som utgjorde basen för de skärdata som vi senare använde oss av i experimenten. För att ta reda på vilken skärhastighet som ska användas för trapp-testet gjordes ett försök där flera hastigheter testades med samma matning ( $f=0,1$  mm/varv) och skärdjup ( $a_p=0,5$  mm). Ytfinheten uppmättes på samtliga 7 fält.

Observationer gjordes under körningarna enligt nedan:

---

- 
1.  $v_c = 20$  m/min

En kraftig gradbildning uppstod eftersom skäret tryckte material framför sig i matningsriktningen. En hel del löseggar fastnade på arbetsstycket.

2.  $v_c = 50$  m/min

Det uppkom aldrig någon grad- eller löseggsbildning vid denna hastighet. Endast lite material trycktes framåt av verktyget.

3.  $v_c = 70$  m/min

Denna hastighet fick grader men mindre än i första och mer än andra testet.

4.  $v_c = 90$  m/min

Graderna vid denna körning blev mycket kraftiga och här började löseggen följa med spånan också.

5.  $v_c = 120$  m/min

Endast lite grader och löseggar bildades under denna hastighet.

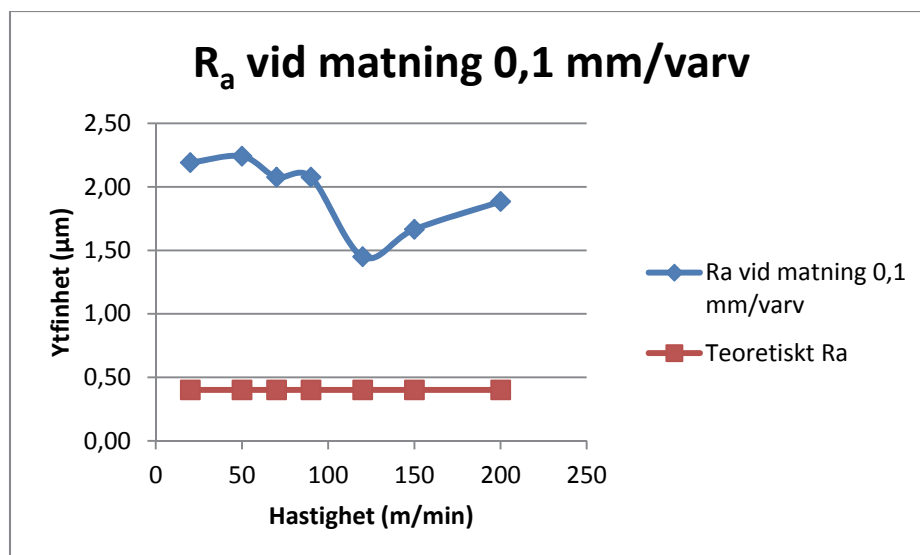
6.  $v_c = 150$  m/min

Ingen som helst tendens till grader och väldigt fin visuell yta på arbetsstycket däremot började spånorna glöda. Löseggarna följde med spånan istället för att stanna på arbetsstycket.

7.  $v_c = 200$  m/min

Samma iakttagelser som på föregående körning.

8 stycken ytfinhetsmätningar gjordes där det högsta och lägsta värdet togs bort och medelvärdet redovisas i Figur 22 och Tabell 8.



Figur 22 Ytfinhetsmätningar vid olika skärhastigheter.



---

Tabell 8 Ytfinhetsmätningar vid olika skärhastigheter.

(m/min)	R <sub>a</sub>	R <sub>max</sub>	R <sub>z</sub>
20	2,19	15,60	11,65
50	2,24	14,25	11,42
70	2,08	13,13	10,87
90	2,08	12,94	10,35
120	1,45	10,35	8,36
150	1,67	12,08	9,28
200	1,88	13,70	10,00

Bäst ytfinhet uppnåddes då en skärhastighet på 120 m/min användes och blir då den hastighet som kommer att användas på trapp-testet. Den teoretiska ytfinheten R<sub>a</sub> på 0,4 µm, i det här fallet, gick inte att uppnå. Lika så för det teoretiska R<sub>max</sub> på 1,56 µm gick inte att uppnå.

---

---

---

## 6 Resultat

### 6.1 Koppar

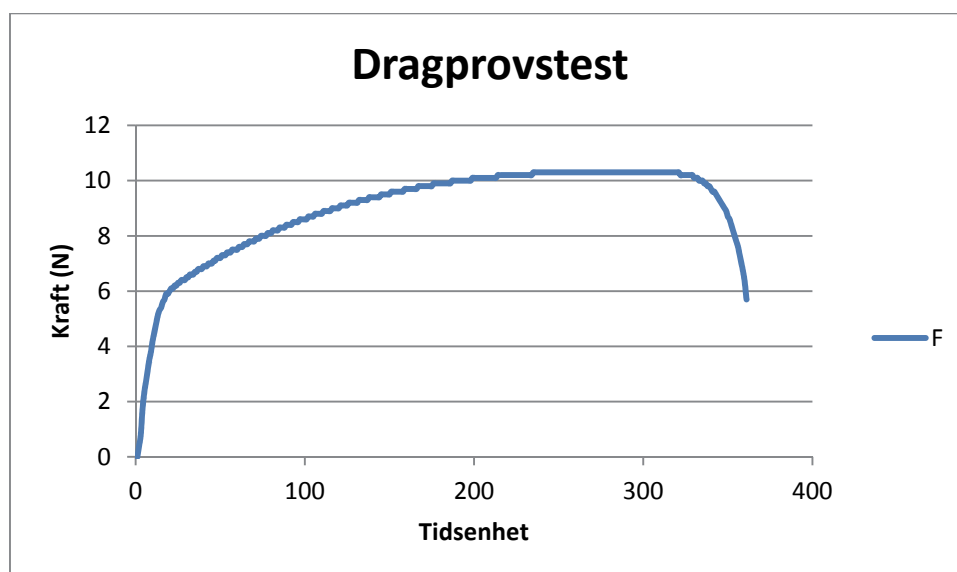
#### 6.1.1 Dragprov

Tre dragprovstester gjordes där ett av resultaten redovisas i Figur 23 och Figur 24. Kraften har plottats mot tiden vilket har resulterat i en kraftkurva i Figur 23. Med den erhålls brottgränsen  $R_m$  vid högsta punkten av kurvan, där kraften  $F$  divideras med tvärsnittsarean  $A$ .

I Tabell 9 redovisas resultaten från de tre dragprovstesterna.

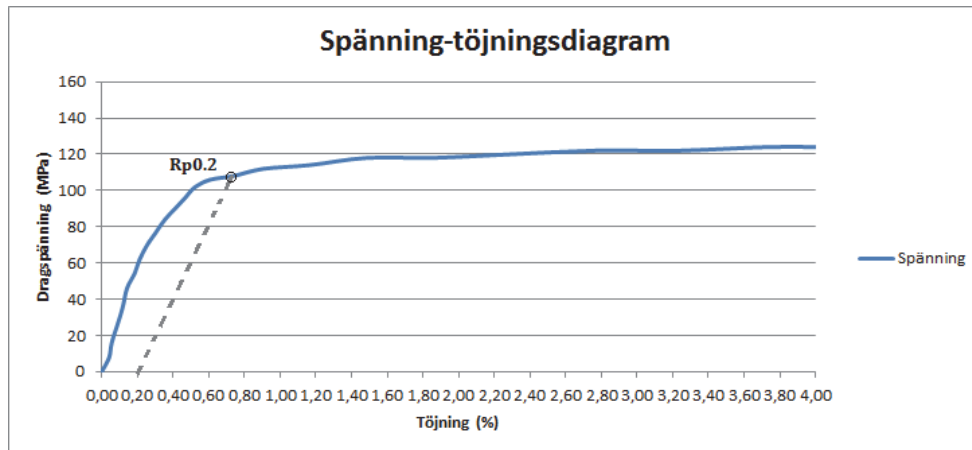
Tabell 9 Resultat från dragprover.

	Brottgräns ( $R_m$ , [MPa])	Sträckgräns ( $R_{p0.2}$ , [MPa])	Brottöjning ( $\epsilon_b$ , [%])
1	202	82	41
2	210	101	41
3	206	108	45
Medel	206	97	42



Figur 23 Kraftkurva.

Sträckgränsen  $R_{p0.2}$  fås genom att plastisera materialet så att en töjning på 0.2% erhålls vid avlastning. Figur 24 nedan visar sträckgränsen  $R_{p0.2}$ .



Figur 24 Spänning-töjningsdiagram.

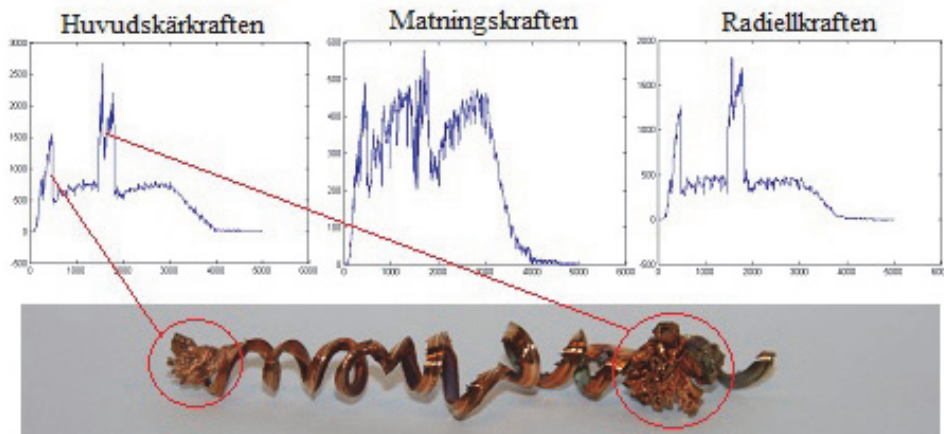
### 6.1.2 Spånor

Genomgående för de olika testen är att samtliga skärverktyg har problem med spånbrytningen då spånorna oftast blir långa och kontinuerliga. I Figur 25 nedan visas ett exempel på en spåna som packas då en högre matning har använts och en spåna med mindre matning som inte packas på samma sätt.



Figur 25 Två exempel på spånor med olika matning. Obehandlat hårdmetallskär (HMO)

Kopparmaterialet är ett mycket oberäkneligt material som i ena stunden bearbetas med goda resultat till att börja kleta och packa sig. Ett vanligt fenomen som inträffade, speciellt på de lite större matningarna, var att spånan packade sig på skärverktyget. Spånflödet hade då helt avstannat under några kortare perioder, vilket byggde upp spänningar som syntes i skärkraftsgraferna, se Figur 26.

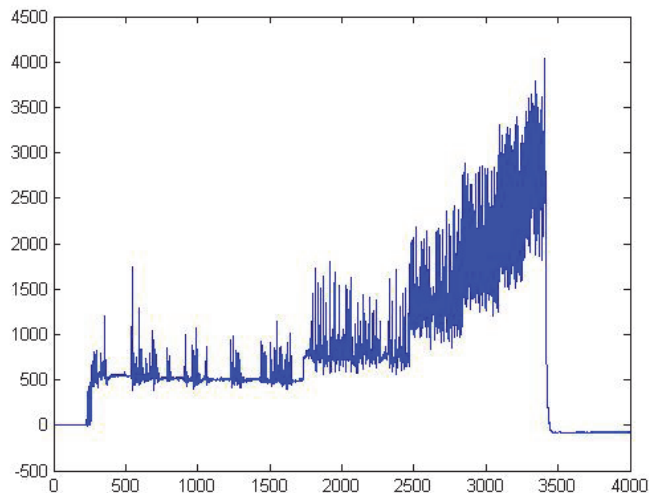


Figur 26 Spånpackning vid svarvning med hastighet 90m/min, matning 0.4mm/varv och HMO som skärverktyg. (Kraft-tid diagram).

Det kom till att uppstå problem när spånan gick tillbaka på den nyss bearbetade ytan. Materialet bildar kontinuerliga spånor som ingen spånbrytare kan rå på och vid tillbakagång på arbetsytan fås en adhesion mellan de båda. Resultatet blir förödande för ytfinheten.

### 6.1.3 Skärmotstånd matningstrappa

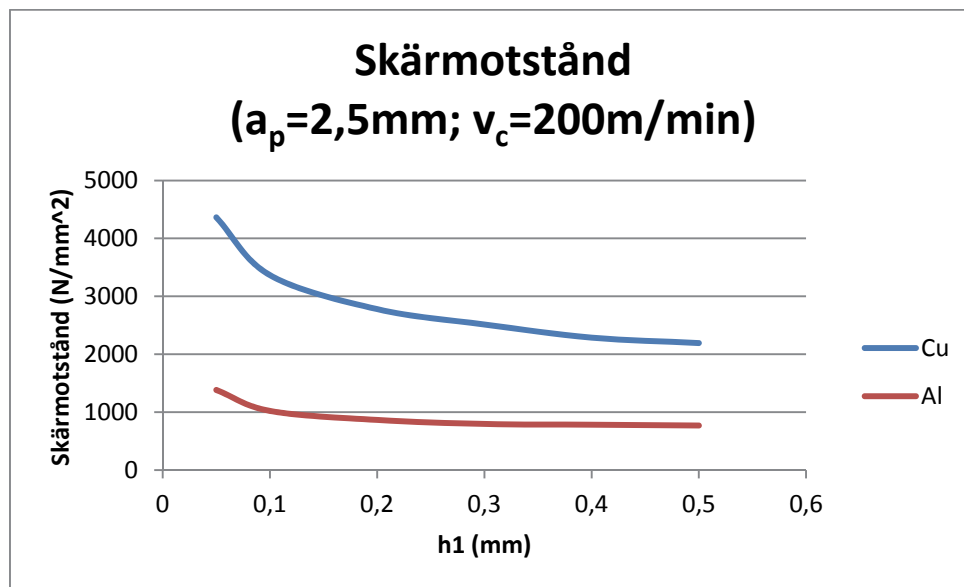
I Figur 27 nedan visas resultatet av mätningarna av huvudskärkraften under utförande av en matningstrappa där skärhastigheten är konstant 200 m/min, skärdjupet är 2.5 mm och matningen varierar mellan 0.05-0.5 mm/varv.



Figur 27 Uppmätta huvudskärkrafter vid matningstrappa. (Kraft-tid diagram).

Ur grafen kan man se tydliga toppar då spånor byggs upp vid verktygen för att senare släppa, då sänks huvudskärkraften igen. Det uppstår också en del problem med vibrationer som påverkar mätningarna.

I Figur 28 har skärmotståndet räknats ut från experimentet med matningstrappan. Beräknat skärmotstånd för OFC jämförs med skärmotståndet för aluminium som vi utförde en matningstrappa för. Detta för att ha ett referensmaterial för att verifiera resultaten för OFC. I grafen kan man se att skärmotståndet ligger mycket högre än aluminium. Skärmotståndet sjunker snabbt med ökad matning vilket stämmer bra överens med teorin.



Figur 28 Skärmotstånd matningstrappa.

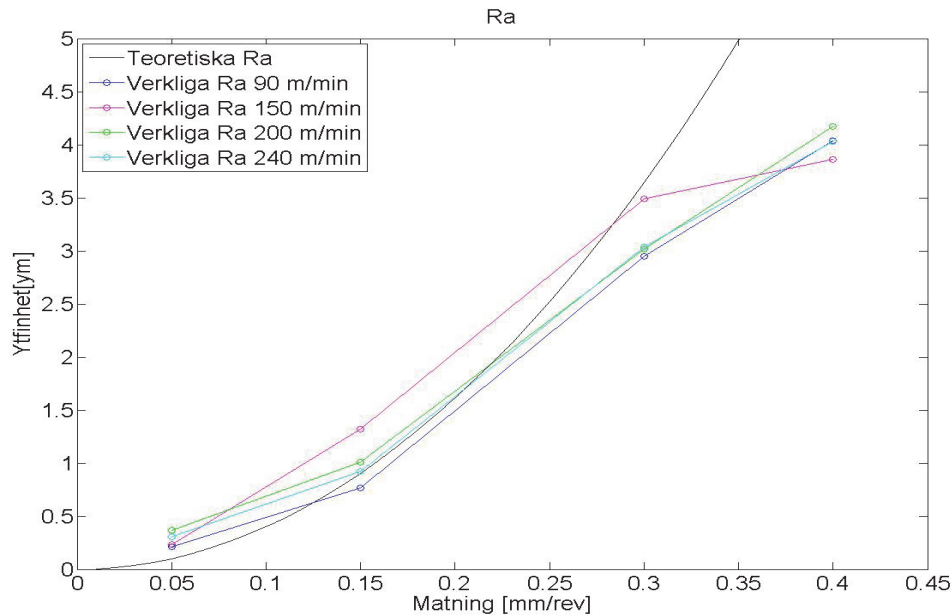
### 6.1.4 Obehandlat hårdmetallskär

HMO visade bäst resultat på de låga hastigheterna för de olika matningarna. De tre lägsta matningarna (0,05, 0,15, 0,3) uppnådde bäst ytfinhet vid 90 m/min medan för matningen 0,4 mm/varv var hastighet 150 m/min den bästa, se Tabell 10.

Tabell 10 Sammanställning av ytfinhet  $R_a$  för HMO.

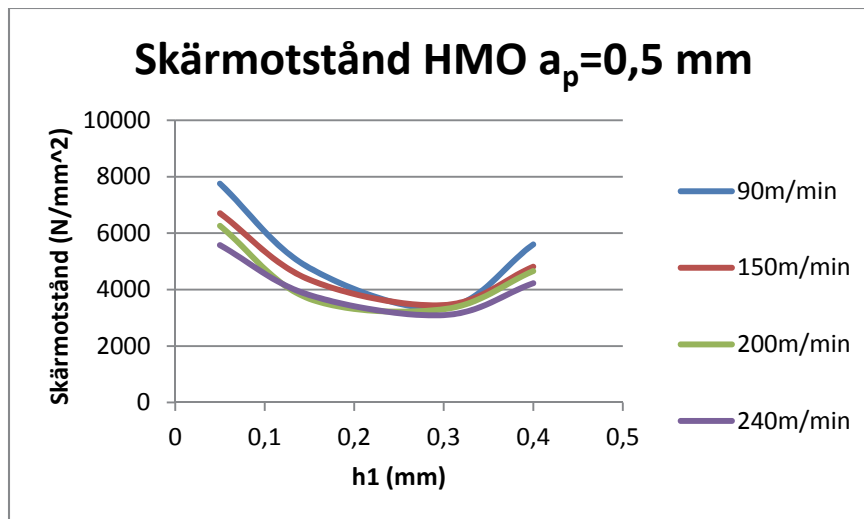
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Matning (mm/varv)			
vc (m/min)	0,05	0,15	0,3	0,4
<b>90</b>	0,21	0,77	2,95	4,04
<b>150</b>	0,23	0,96	3,49	3,86
<b>200</b>	0,37	1,01	3,02	4,17
<b>240</b>	0,31	0,92	3,04	4,03

Ytfinhetsgrafen nedan i Figur 29 visar hur spridningen på mätvärdena varierar och där medelvärdet plottas som en linje. Vid en jämförelse av teoretiska ytfinheten uppnås oftast en lägre och finare yta i verkligheten, i alla fall vid våra experiment. Det blir dock högre värden än de teoretiska vid matningarna 0.05 mm/varv.



Figur 29 Ytfinhetsgraf HMO.

Ett mått på skärbarheten är skärmotståndet som illustreras nedan i Figur 30. Detta visar på att det är ett väldigt svårbearbetat material som uppnår stora skärmotstånd, vilket kan jämföras med material som stål.



Figur 30 Skärmotståndsgraf HMO.

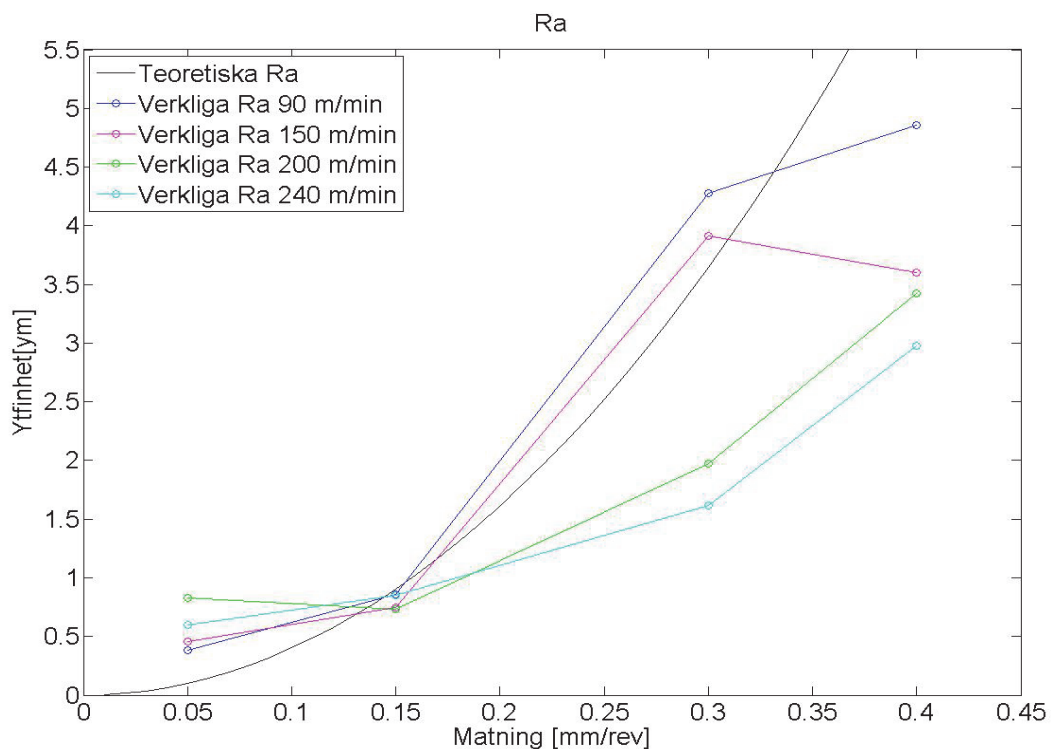
### 6.1.5 Obehandlat hårdmetallskär wiperutförande (Wiper)

Vändskäret i Wiper-utförande ska ge en bättre ytfinhet än HMO som har liknande geometri utan wiper, alltså utan fas. Nedan i Tabell 11 visas resultaten från experimentet med wiperskåret.

Tabell 11 Sammanställning av ytfinhet  $R_a$  för Wiper.

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Matning (mm/varv)			
$v_c$ (m/min)	0,05	0,15	0,3	0,4
90	0,38	0,86	4,28	4,86
150	0,45	0,75	3,91	3,60
200	0,83	0,73	1,97	3,42
240	0,60	0,85	1,62	2,98

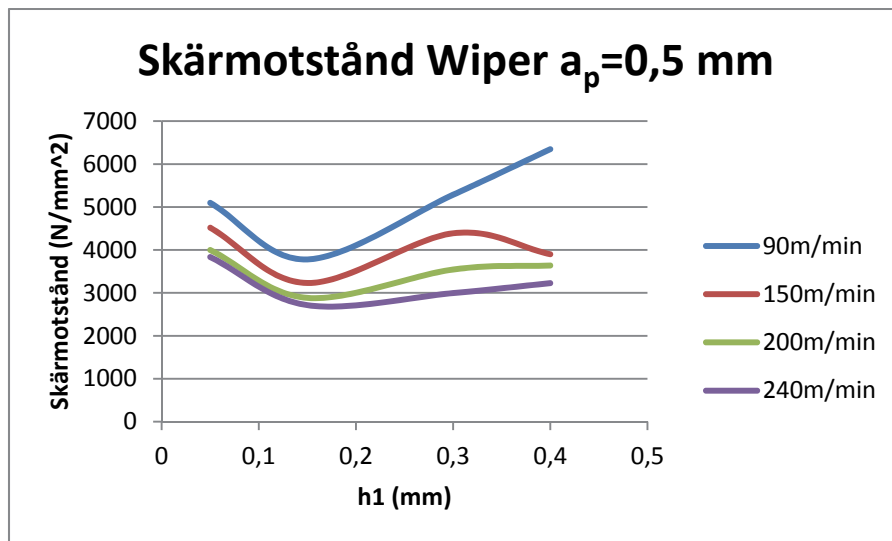
Bäst resultat gav experimentet med skärhastighet 240 m/min. Nedan visas grafen för dessa där man kan se spridningen av mätvärdena för ytfinheten i Figur 31.



Figur 31 Ytfinhetsgraf Wiper.

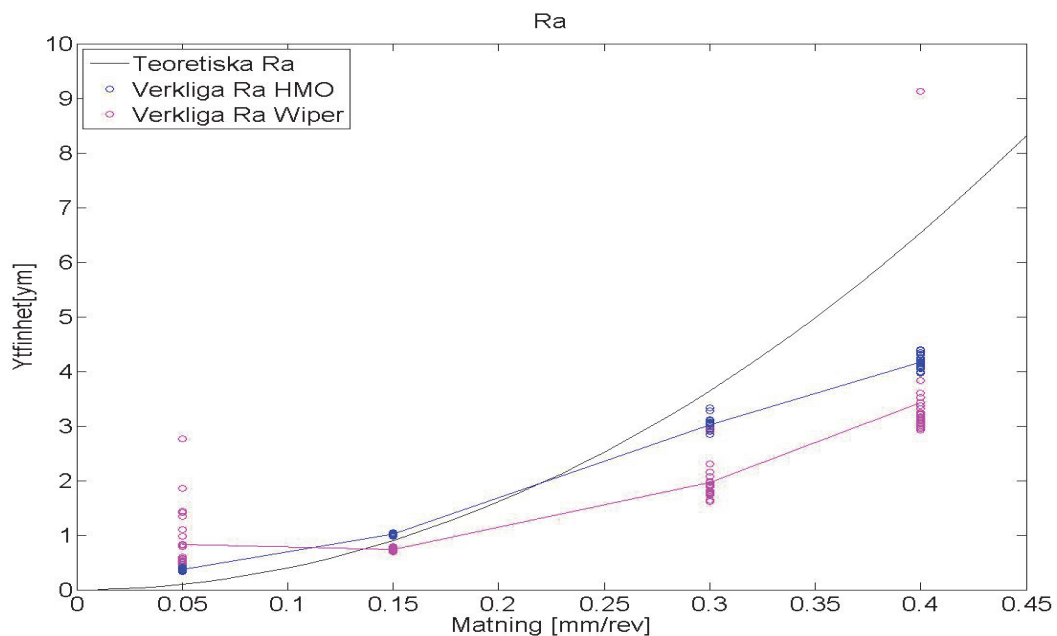
Skärmotståndet för Wipern visas nedan i Figur 32 och följer inte standardutseendet som vi är vana vid.





Figur 32 Skärmotståndsgraf Wiper.

Om man analyserar de båda skären, HMO och Wiper, hur de bearbetar och vad de lämnar för yta kan man se att Wipern får en bättre ytfinitet när hastigheten ökar. Vid höga hastigheter och matningar fås till och med lägre skärmotstånd för Wipern än för HMO:n. Egentligen borde vi få högre skärkrafter för Wipern på grund av större anläggningsyta men detta kan bero på att Wipern har mindre spånvinkel (MF1) än HMO (MR3) se Figur 33.



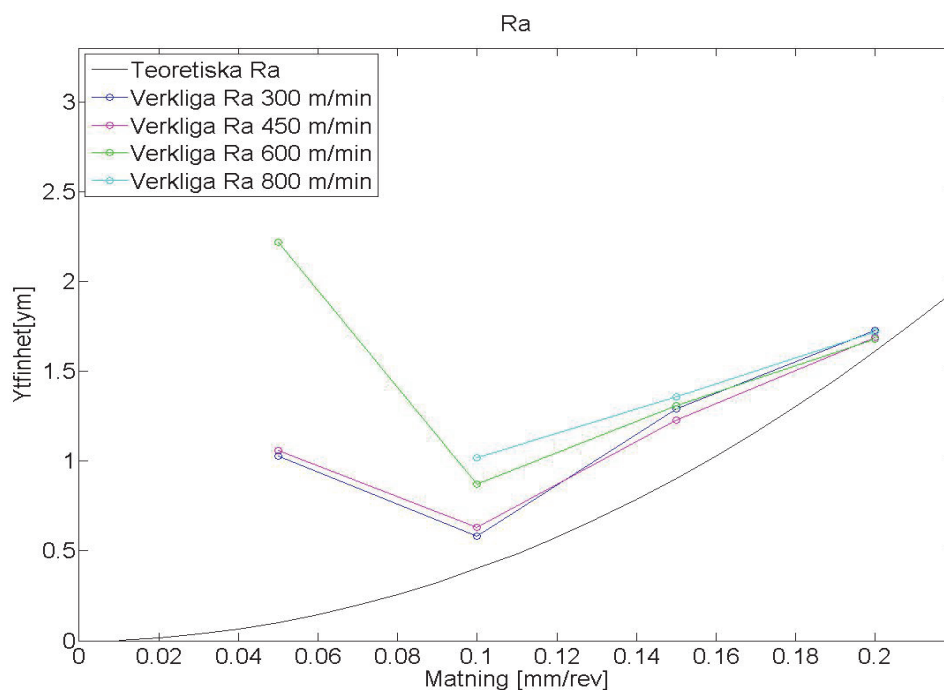
Figur 33 Jämförelse ytfinitet mellan HMO och Wiper.

### 6.1.6 TiSiN-TiAlN belagd hårdmetallskär (HMB)

I Tabell 12 visas  $R_a$  medelvärde för HMB, värdena plottas i Figur 34 mot den teoretiska ytfinhetskurvan. Medelvärdena för en matning på 0.05 kan tyckas se relativt bra ut men i verkligheten hade de enskilda värdena en stor spridning allt från 0.5-9  $\mu\text{m}$ , för en skärhastighet på 800 m/min gick det inte att utföra ytfinhetsmätningar på grund av ojämn yta av materialet. Det var även noterbart att ytfinheten vid 800 m/min för de olika matningarna började variera betydligt mer än för övriga skärhastigheter. De intervall som bäst resultat uppnåddes var vid en skärhastighet på 300-600 m/min och en matning på 0.1-0.2.

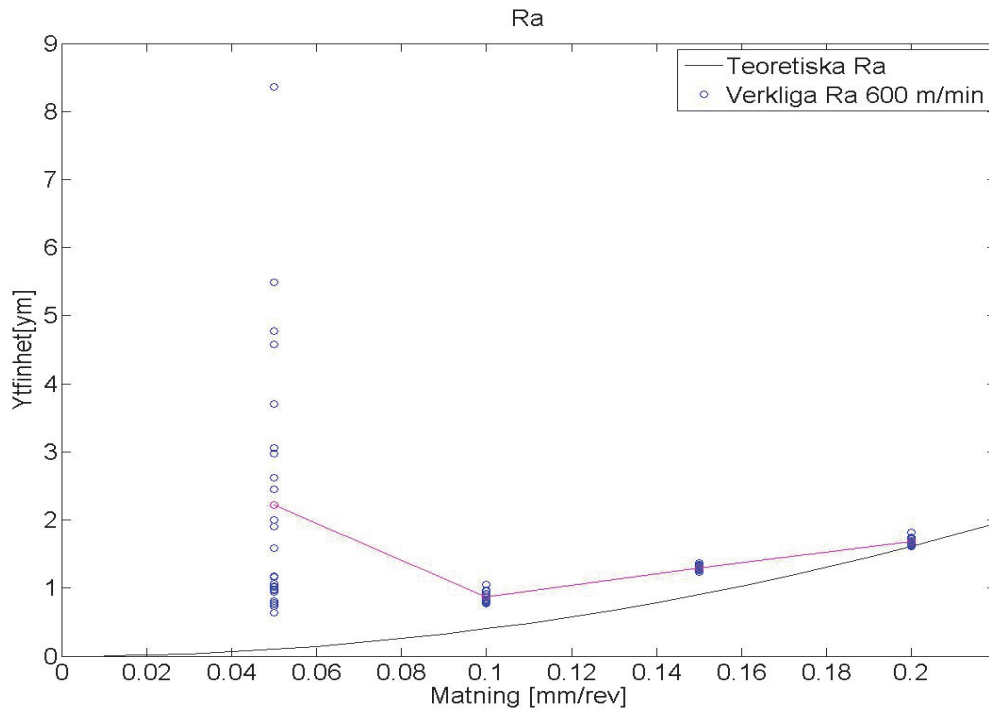
Tabell 12 Sammanställning av ytfinhet  $R_a$  för HMB.

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Matning (mm/varv)			
$v_c$ (m/min)	0,05	0,1	0,15	0,2
300	1,03	0,59	1,29	1,72
450	1,06	0,63	1,23	1,69
600	2,22	0,87	1,30	1,68
800	-	1,02	1,36	1,72



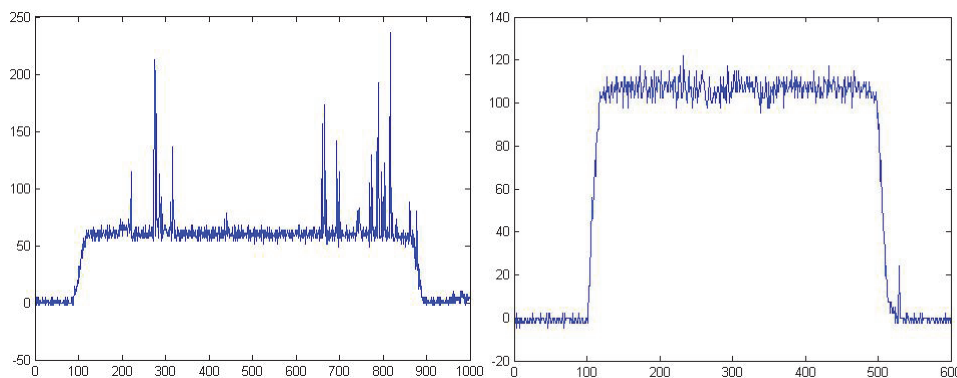
Figur 34 Ytfinhetsgraf HMB.

I Figur 35 plottas medelvärdet av ytfinheten mot matningen för en skärhastighet på 600 m/min, detta plottas mot den teoretiska ytfinhetskurvan. Här syns att spridningen på ytfinheten med en matning på 0,05 mm/varv är betydligt större än de övriga matningarna.



Figur 35 Medelvärde av ytfinhet för en hastighet på 600 m/min, HMB.

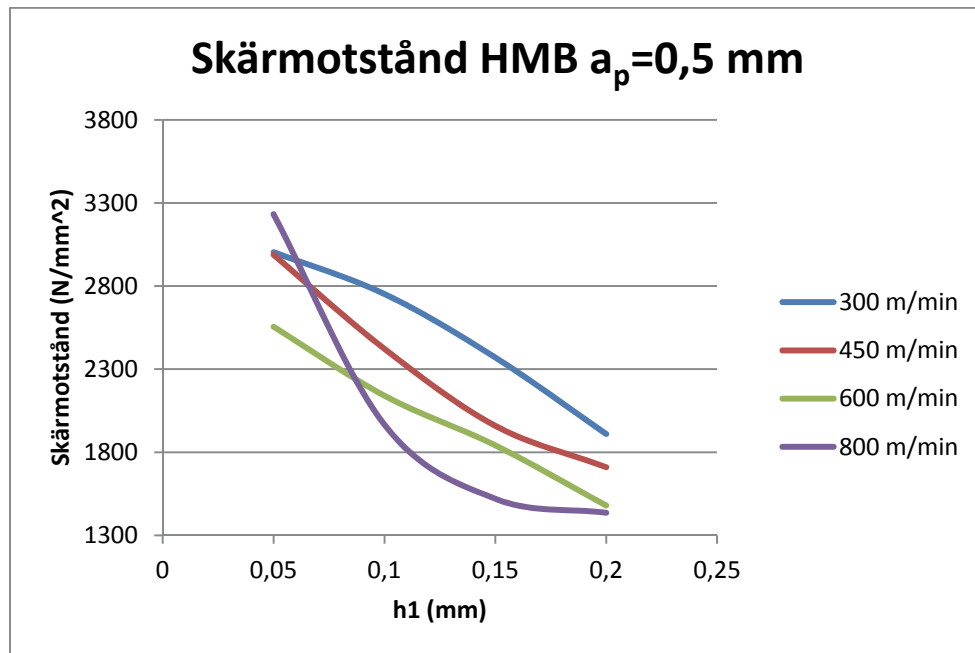
I Figur 36 visas huvudskärkraften för HMB med en skärhastighet på 600 m/min och en matning på 0,05 respektive 0,1. I grafen för en matning på 0,05 kan man se att det återkommer toppar i skärkraften vilket kan härledas till problem med att spånan packas framför verktyget och även kletar på materialet. Detta påverkar ytfinheten vilket förklarar varför ytfinheten för matningen 0,05 blir väldigt varierande. Den andra skärkraftsgrafan visar en matning på 0,1 där blev huvudskärkraften mer jämnt samlad. Huvudskärkraften stabiliseras runt 105 N utan några större toppar som sticker iväg och påverkar ytfinheten negativt.



Figur 36 Huvudskärkraftsgrafer för HMB med skärhastighet 600 m/min och matning 0,05 respektive 0,1. (Kraft-tid diagram).

I Figur 37 visas skärmotståndet för de tester som utfördes för HMB-skäret. Skärmotståndet minskar med ökad hastighet vilket beror på att skärkrafterna minskar med ökad hastighet. Det finns ett

undantag som avviker mot mönstret vilket är en hastighet på 800 m/min och matning 0,05 mm/varv, detta kan ha att göra med adhesion som uppstod där spånorna fastnade på materialet.



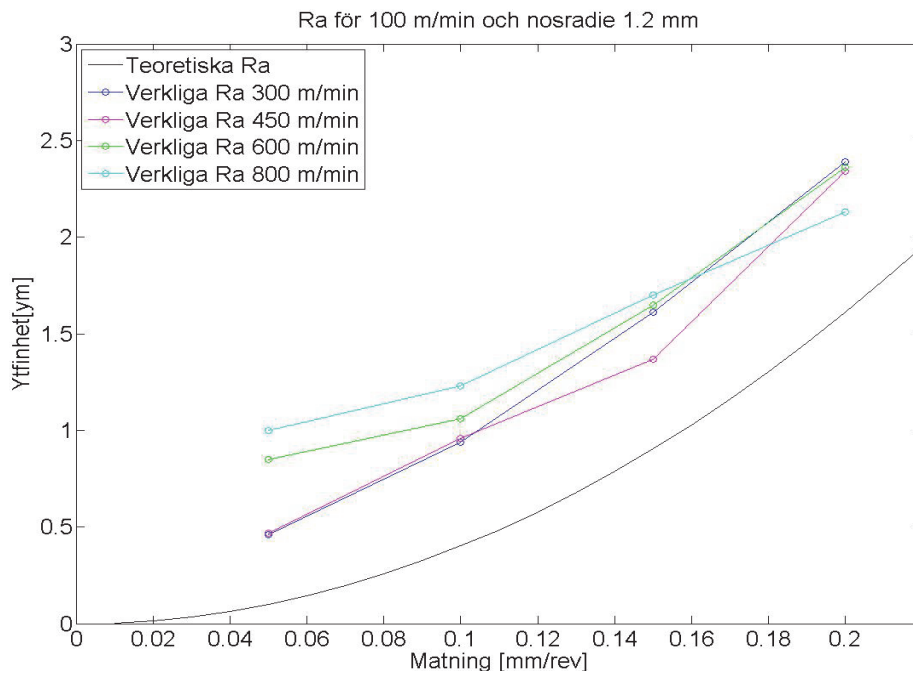
Figur 37 Skärmotståndsgraf HMB.

### 6.1.7 Polykristallindiamant (PCD)

I Tabell 13 visas  $R_a$  medelvärde för PCD, värdena plottas i Figur 38 mot den teoretiska ytfinhetskurvan. Med en hastighet på 800 m/min avviker ytfinheten jämfört med den teoretiska ytfinheten främst på lägre matningar jämfört med de andra hastigheterna. Detta syntes i ytfinhetsmätningarna där värdena hade större spridning än för lägre hastigheter.

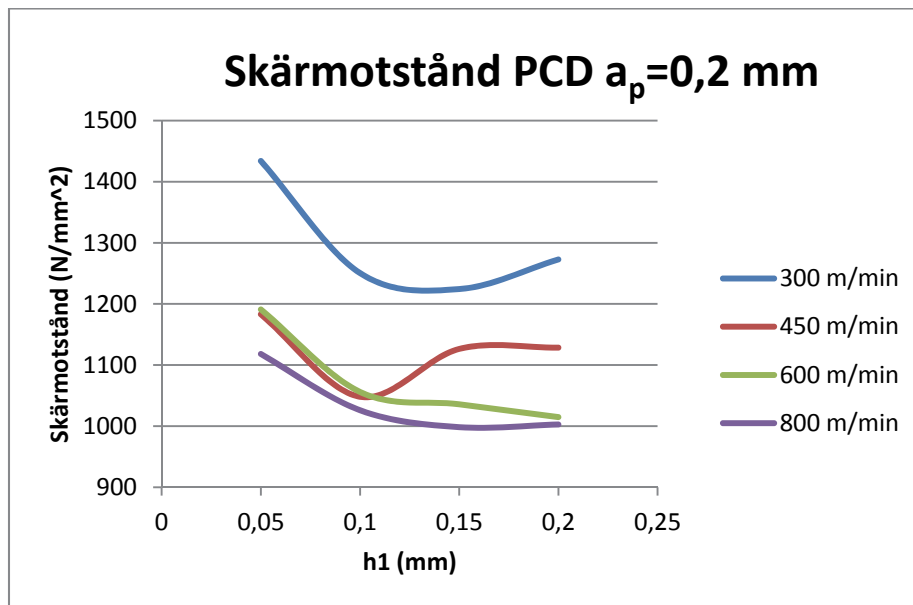
Tabell 13 Sammanställning av ytfinhet  $R_a$  för PCD.

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Matning (mm/varv)			
$v_c$ (m/min)	0,05	0,1	0,15	0,2
300	0,49	0,94	1,62	2,52
450	0,46	0,96	1,39	2,32
600	0,69	1,01	1,64	2,37
800	0,97	1,26	1,72	2,14



Figur 38 Yfihetsgraf PCD.

I Figur 39 visas skärmotståndet för de tester som utfördes med PCD-skär. Skärmotståndet är betydligt lägre än för de andra skären. Detta eftersom huvudskärkraften ligger på mellan 10-50 N beroende på hastigheten



Figur 39 Skärmotståndsgraf PCD.

---

## 6.2 Niob

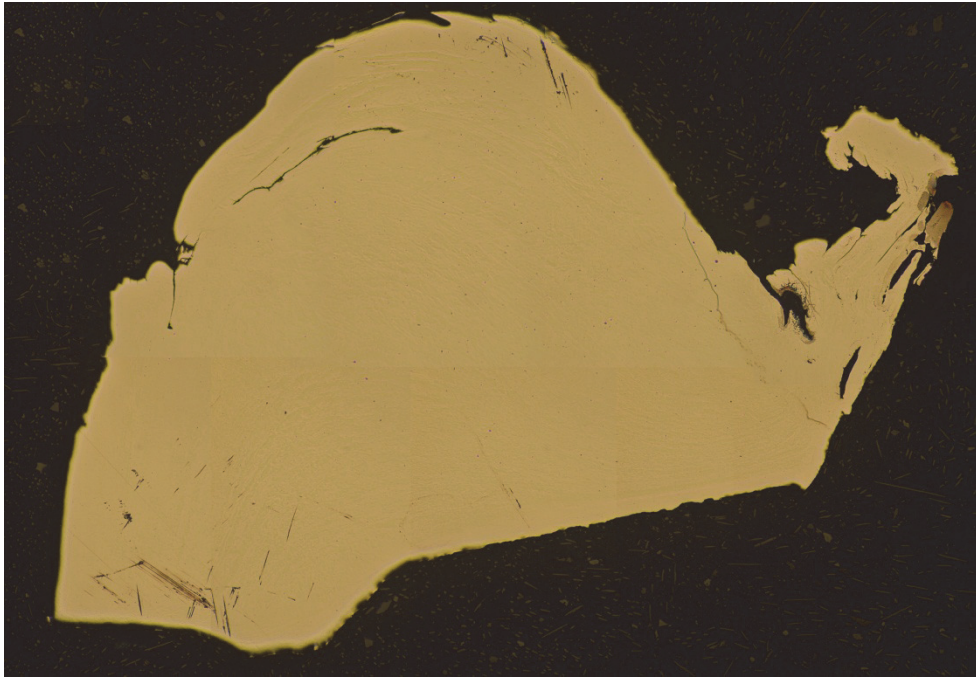
### 6.2.1 Spånbildning

Bearbetning av niob ger upphov till långa kontinuerliga spånor enligt Figur 40. I bästa fall styrs spånan iväg från den bearbetade ytan men när den återgår på arbetsmaterialet uppstår återsvetsning av spånan i form av adhesion på arbetsstycket.

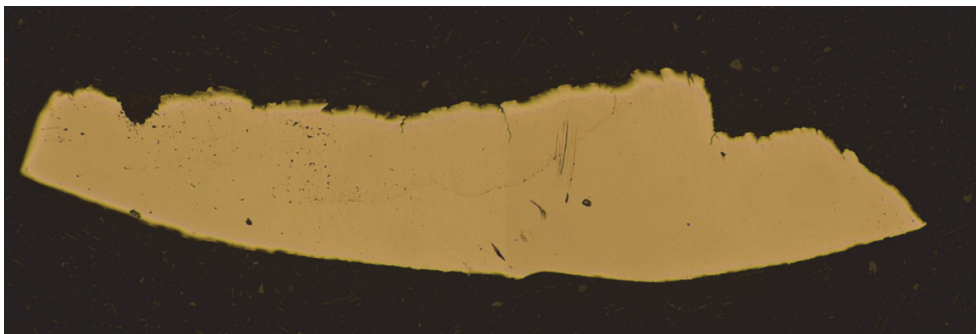


*Figur 40 Bearbetning av niob.*

Figur 40 är tagen vid trapp-testet och har då en matning på 0.4 mm/varv och skärdjup 1.5 mm. Tvärsnittet från denna spåna visas i Figur 41 med en förstoring 5. Undersidan på spånan har legat mot skärverktygets huvudskärssida, där av formen. Den taggiga delen av spånan närmast verktygshållarens skaft finner man till höger i Figur 41. Vänstra delen är spånan närmast arbetsstycket. Ovansidan av spånan ser man en tydlig vallbildning som beror av matningen. I Figur 42 ses en låg vall i jämförelse med Figur 41.



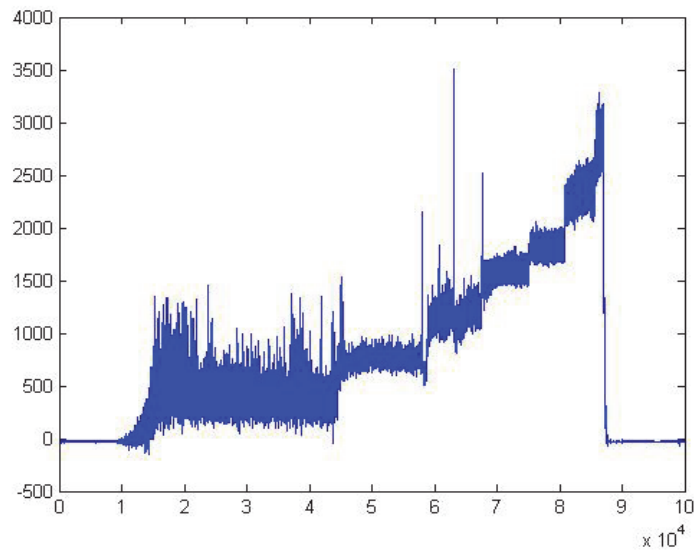
*Figur 41 Tvärsnitt av spåna med matning 0.4 mm/varv och  $a_p$  1.5 mm.*



*Figur 42 Tvärsnitt av spåna med matning 0.05 mm/varv och  $a_p$  1.5 mm.*

### **6.2.2 Skärmotstånd**

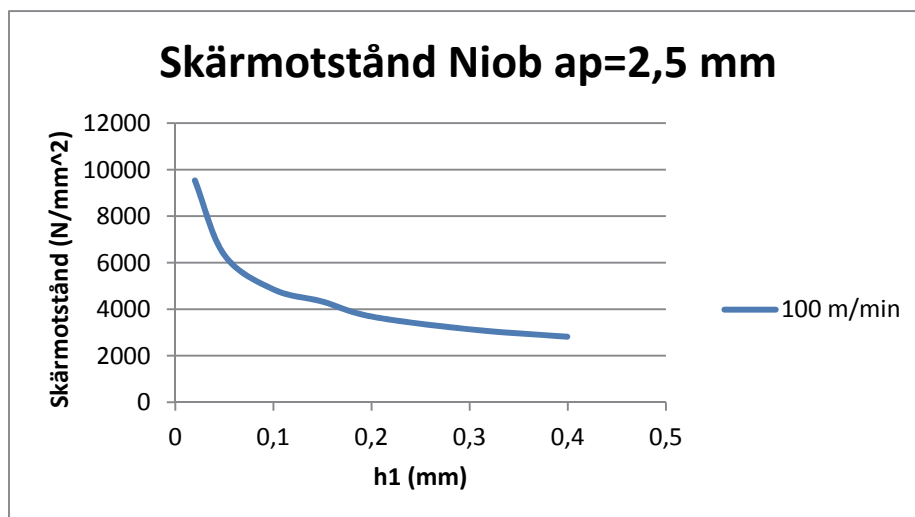
Nedan i Figur 43 visas resultatet av mätningarna av huvudskärkraften under utförande av en matningstrappa där skärhastigheten är konstant 100 m/min, skärdjupet är 2.5 mm och matningen varierar mellan 0.02-0.4 mm/varv. Ett verktyg med en nosradie på 0.8 mm användes.



Figur 43 Uppmätta huvudskärkrafter vid matningstrappa. (Kraft-tid diagram).

Ur grafen kan man se att vid den lägsta matningen 0.02 mm/varv är det en större variation i huvudskärkraften, detta kan ha med vibrationer att göra men även formen på spånan som blev kontinuerlig och trasslade in sig. När matningen kom upp till 0.2 mm/varv var spånan även kontinuerlig men den trasslade inte in sig utan sköts iväg som en lång spåna bort från arbetsstycket, därav mer samlade värden.

I Figur 44 har skärmotståndet räknats ut från experimentet med matningstrappan. I grafen kan man se att skärmotståndet är relativt högt och är rätt likt det beräknade skärmotståndet som för OFC. Skärmotståndet sjunker snabbt med ökad matning vilket stämmer bra överens med teorin.

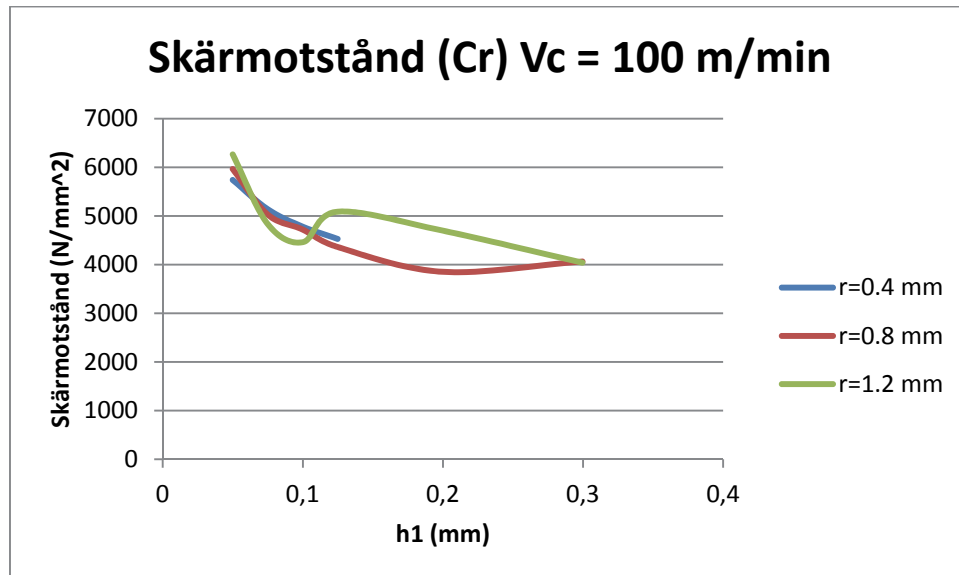


Figur 44 Skärmotstånd matningstrappa.



---

Skärkrafter uppmättes även under ytfinhets experimenten, nedan i Figur 45 visas skärmotståndet för de olika verktygen som användes under experimenten.

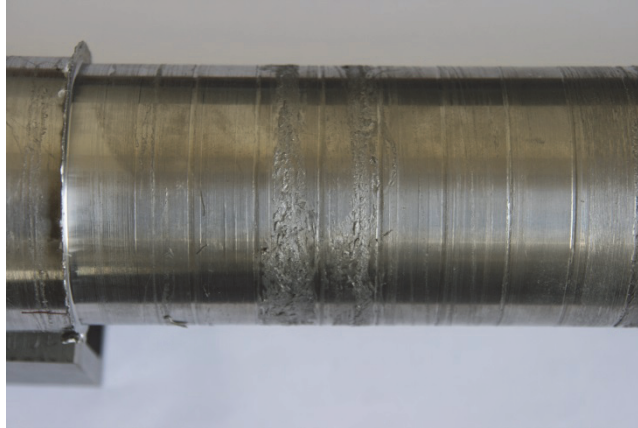


Figur 45 Skärmotstånd för verktyg med olika nosradier.

En jämförelse med Figur 44 visar att skärmotstånden för verktyget med nosradie 0.8 mm är relativt lika med en liten avvikelse för matningen 0.3 mm/varv där skärmotståndet går upp igen i det andra experimentet. Verktyget med nosradie 0.4 mm följde den förväntade skärmotståndskurvan. Skärmotståndet för verktyget med en nosradie på 1.2 mm skiljde sig däremot en del jämfört med de andra där skärmotståndet ökar igen vid en matning på 0.125 mm/varv för att sedan vända och gå ner igen. Men skärmotståndet ligger fortfarande över det förväntade skärmotståndet jämfört med de mindre matningarna.

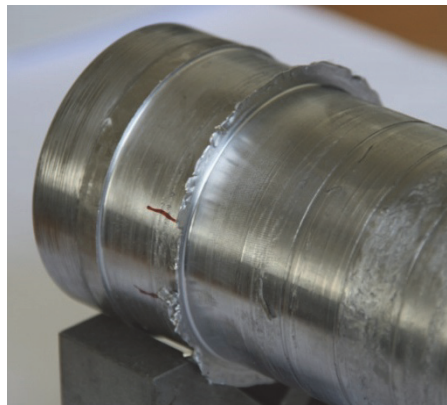
### 6.2.3 Ytfinhet

Vid ytfinhetsexperimenten användes en konstant skärhastighet på 100 m/min och skärdjup på 1.5 mm, matningen varierade mellan 0.05-0.3 mm/varv. Det visade sig vara svårt att uppnå bra ytfinhet för niob, liknande problem uppstod för niob som de vi stötte på för OFC. Ett stort problem är adhesion av spånor på arbetsmaterialet vilket visas i Figur 46. Svårigheter med att bryta och få bort spånorna från arbetsmaterialet gör att de ofta fastnar på arbetsmaterialet.



*Figur 46 Adhesion av spånor.*

Ett annat problem som även uppmärksammades både för OFC och niob är den krans som puttas framför materialet under ingreppet, visas i Figur 47.

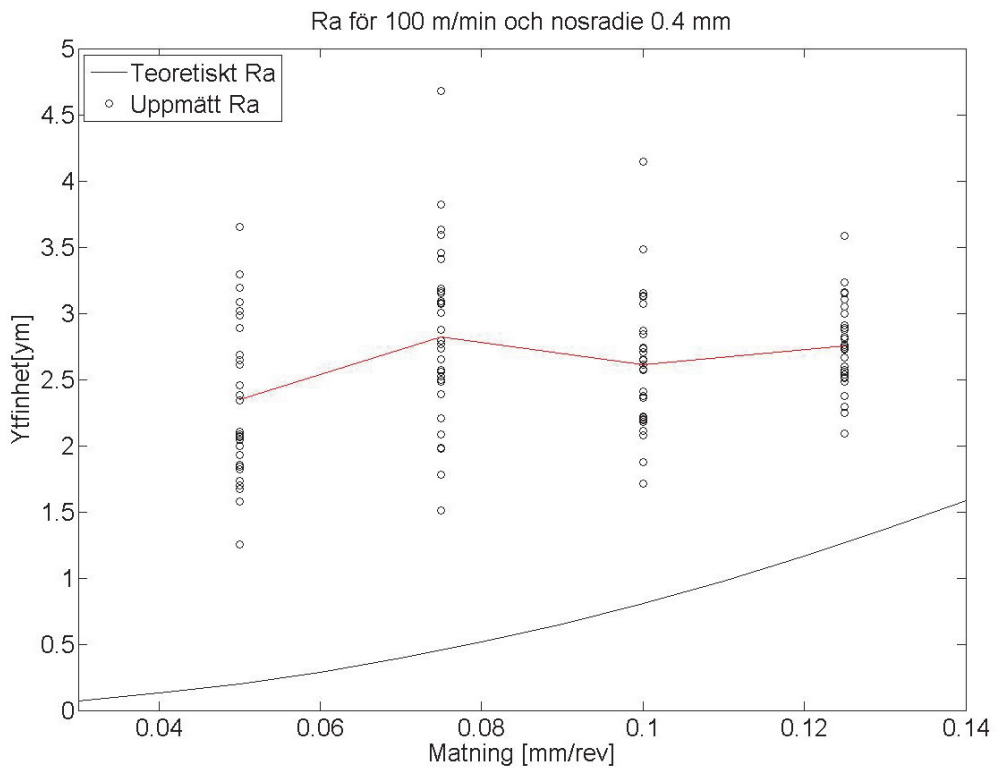


*Figur 47 Uppbyggnad av material som uppstår under ingreppet, gradbildning.*

För varje fält uppmättes 30 mätpunkter för ytfinheten. I Tabell 14 nedan visas ytfinhets  $R_a$ -medelvärden för verktyget med en nosradie på 0.4 mm. De uppmätta ytfinhetspunkterna plottas i Figur 48 mot medelvärdet av punkterna samt den teoretiska ytfinheten. Man kan se i figuren att  $R_a$ -värdet har en stor spridning på alla matningarna

*Tabell 14  $R_a$ -medelvärde för verktyget med nosradie 0.4 mm.*

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Matning (mm/varv)			
Nosradie (mm)	0,05	0,075	0,10	0,125
R = 0.4	2,35	2,82	2,61	2,75

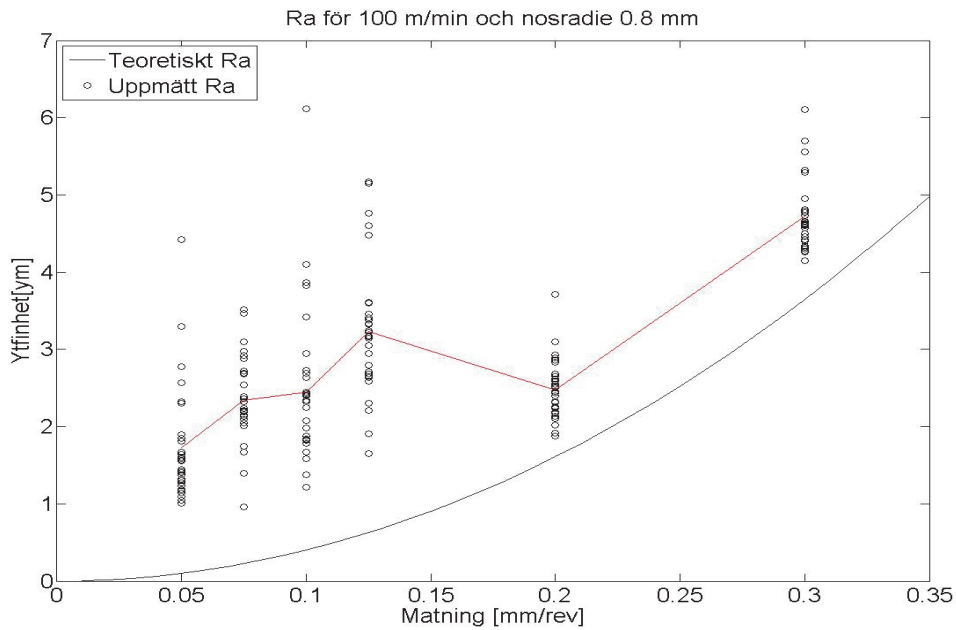


Figur 48 Ytfinhetsgraf för verktyget med 0.4 mm i nosradie.

I Tabell 15 nedan visas ytfinhets  $R_a$ -medelvärdena för verktyget med en nosradie på 0.8 mm. De uppmätta ytfinhetspunkterna plottas i Figur 49 mot medelvärdet av punkterna samt den teoretiska ytfinheten. Även här kan man se i figuren att  $R_a$ -värdet har en stor spridning på alla matningarna.

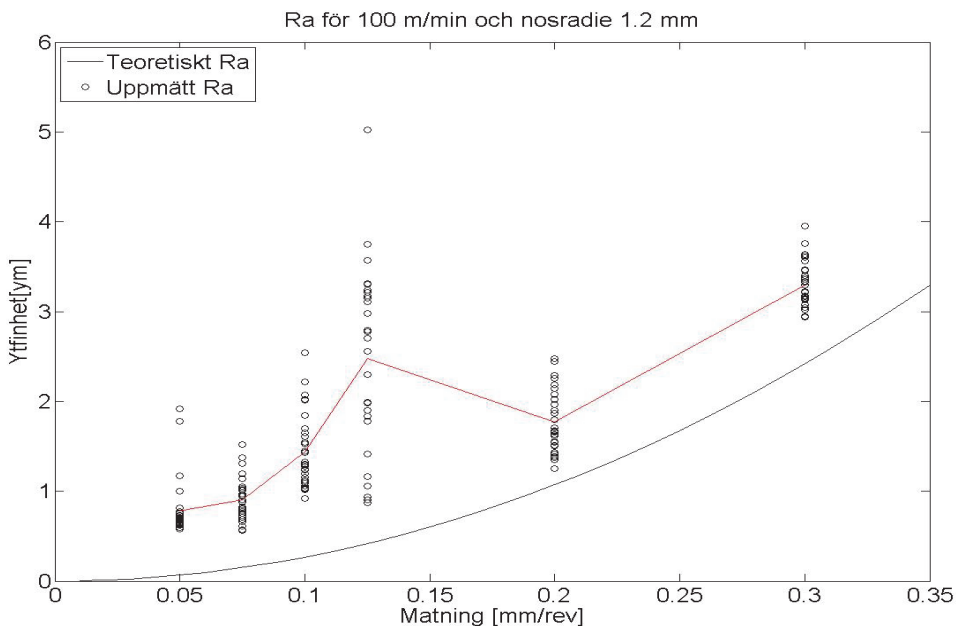
Tabell 15  $R_a$ -medelvärde för verktyget med nosradie 0.8 mm.

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Matning (mm/varv)					
Nosradie (mm)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40
R = 0.8	1,73	2,34	2,45	3,23	2,48	4,72



Figur 49 Ytfinhetsgraf för verktyget med 0.8 mm i nosradie.

I Tabell 16 nedan visas ytfinhets  $R_a$ -medelvärdena för verktyget med en nosradie på 1.2 mm. De uppmätta ytfinhetspunkterna plottas i Figur 50 mot medelvärdet av punkterna samt den teoretiska ytfinheten. Den uppmätta ytfinheten var bäst med detta verktyg då spridningen på de uppmätta punkterna var mindre och de låg närmare den teoretiska ytfinheten.



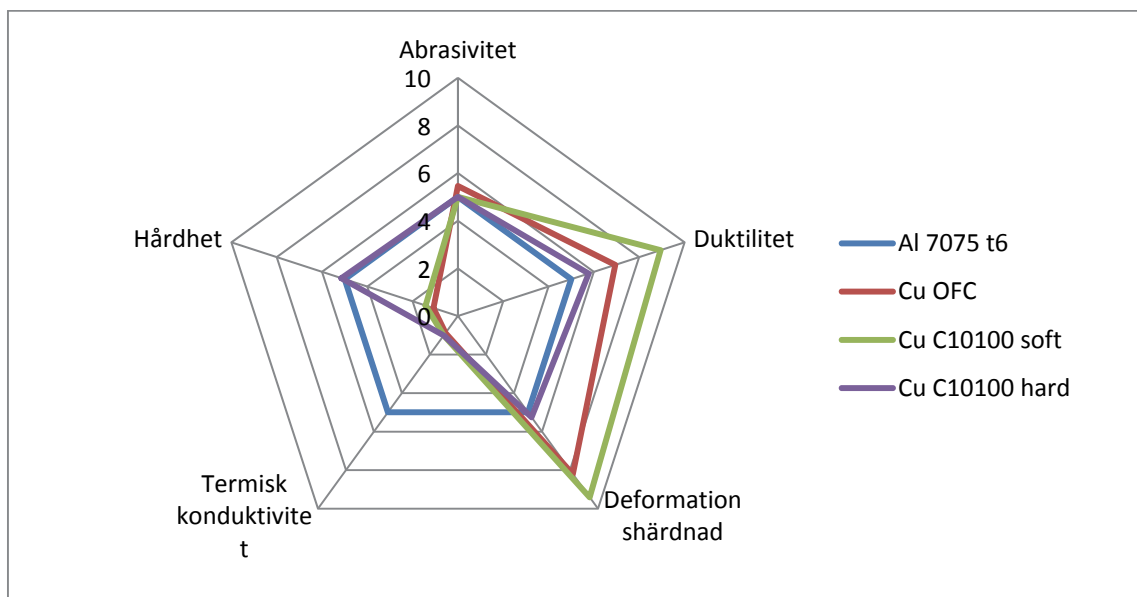
Figur 50 Ytfinhetsgraf för verktyget med 1.2 mm i nosradie.

Tabell 16  $R_a$ -medelvärde för verktyget med nosradie 1.2 mm.

$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Matning (mm/varv)					
Nosradie (mm)	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40
$R = 1.2$	0,78	0,90	1,44	2,73	1,77	3,30

### 6.3 Polära diagram

Efter experimenten erhöles ett polärt diagram av Aluminium 7075 t6 (referensmaterialet), Oxidfri koppar och Niob. Resultatet visas i Figur 51. Niobens abrasivitet gick inte att beräkna därför har vi valt att ha samma värde som för referensmaterialet.



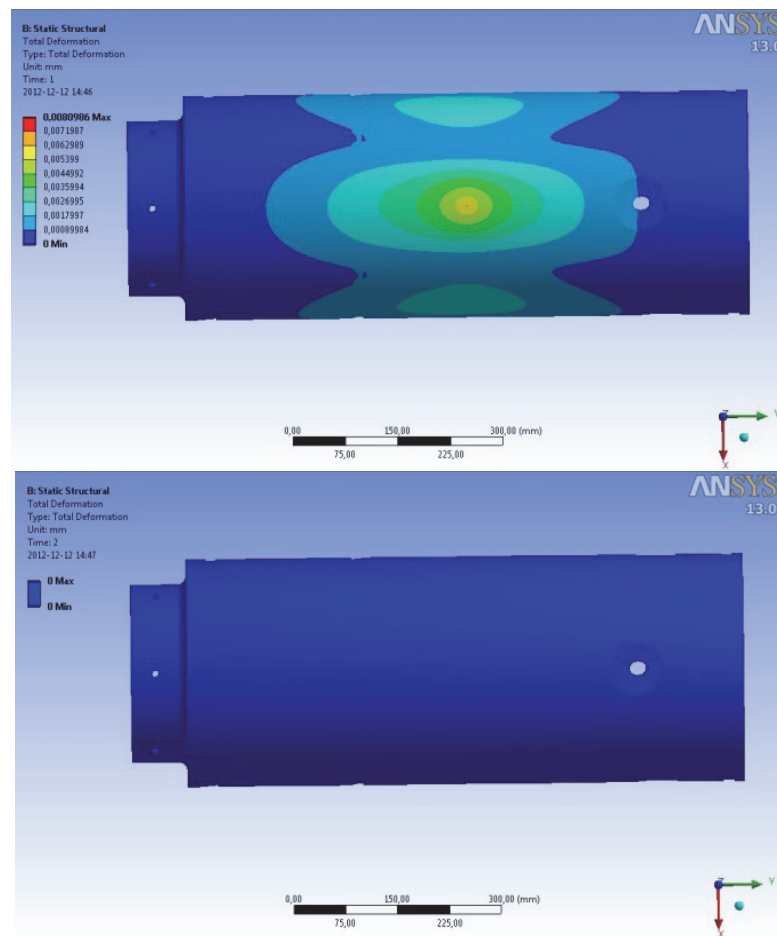
Figur 51 Polärt diagram för materialen Aluminium, Koppar och Niob.

Detta visar på att koppar och niob inte ska bearbetas enligt aluminium och att även koppar och niob inte har samma skärdata vid bearbetning.

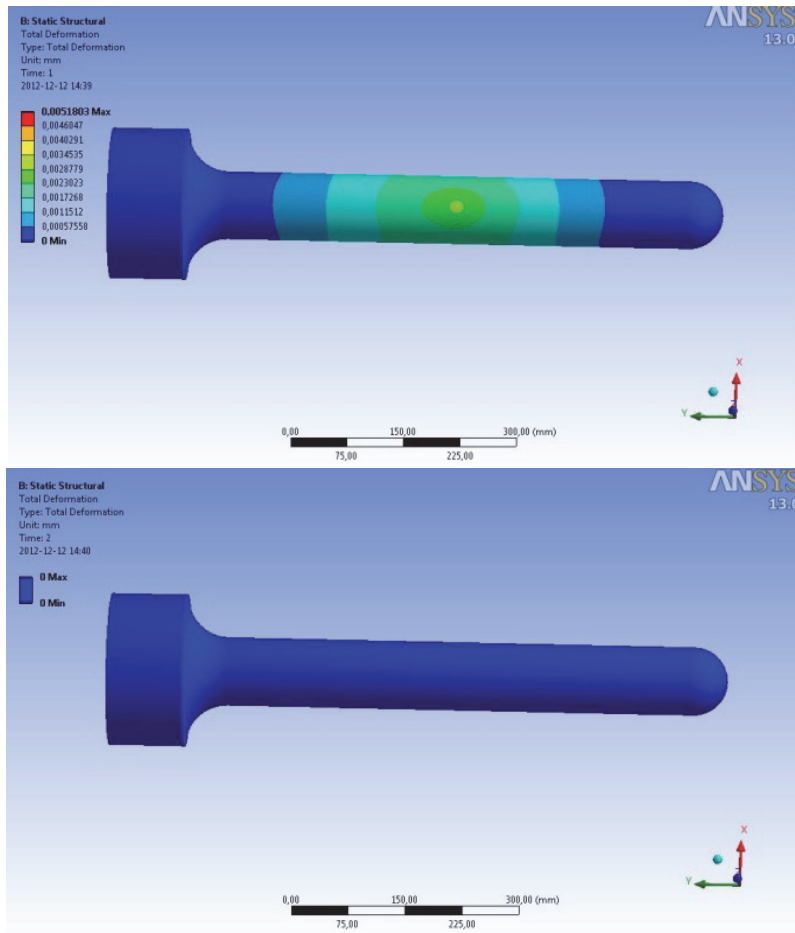
---

## 6.4 FEM-analys

Utifrån de skärkrafter som mättes upp vid OFC testen gjordes en undersökning om skärkrafterna möjligen skulle påverka kaviteten under tillverkningen på något sätt. En modell sattes upp i Ansys Workbench som simulerar en kavitet respektive den cylinder som svetsas fast i kaviteten under ingrepp med svarvande bearbetning. I modellen ansåts först en skärkraft på detaljen för att i nästa steg avlastas från skärkraften.



Figur 52 Deformationsanalys kavitet.



Figur 53 Deformationsanalys kavitet.

I den första figuren i Figur 52 och Figur 53 för respektive detalj ser man hur skärkraften har ansatts, för att sedan i nästa figur avlastas. Resultatet är att det inte blir några bestående deformationer från de skärkrafter som uppstår vid svarvande bearbetning.

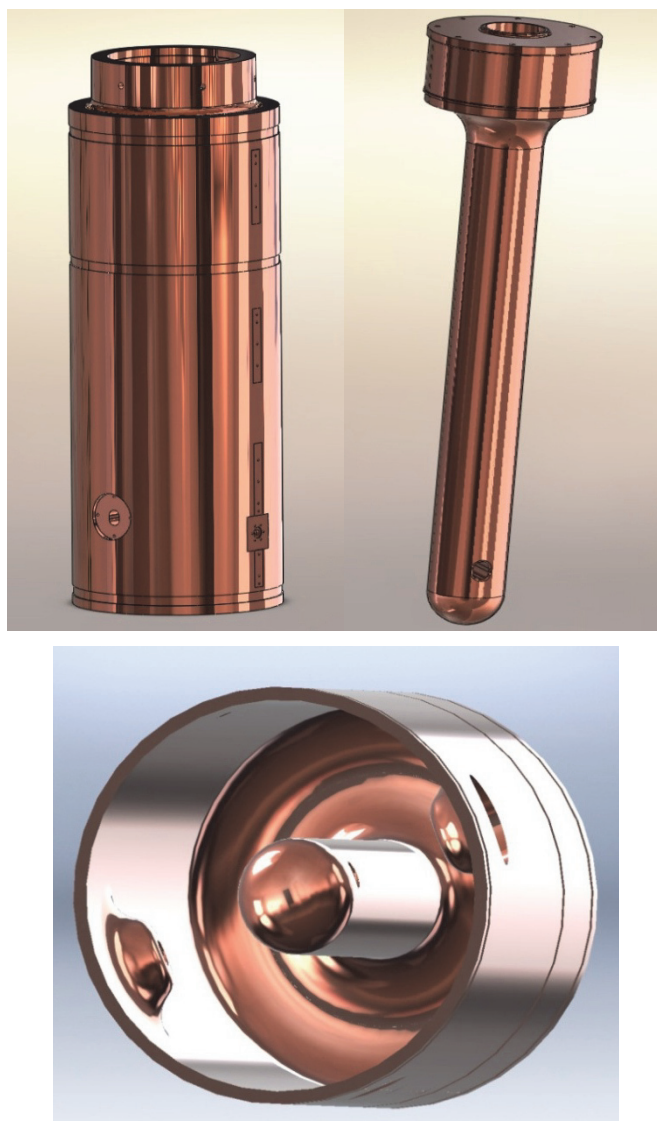
---



---

## 7 Kostnadsanalys

Det är svårt att göra en korrekt kostnadsanalys eftersom en del värden måste uppskattas om de inte har tagits fram genom mätningar. Men en kostnadsanalys kan vara ett bra verktyg för att få en bättre uppskattning om hur mycket en detalj kan kosta vid tillverkningen även om inte alla inparametrar existerar. Ett försök till kostnadsanalys gjordes av kaviteten med hjälp av Ekvation 8. Kaviteten består av ett yttre skal som sedan svetsas på en stång i mitten som då bildar en kavitet, se Figur 54 för de olika delarna och den färdiga kaviteten.



*Figur 54 Vyer över delarna som ingår i kaviteten samt den färdiga kaviteten.*

---

Först måste tillverkningstiden för en detalj uppskattas, de uppskattade tillverkningstiderna fick vi fram genom att dela upp en detalj i sektioner där liknande avverkning utförs till exempel inner- eller yttersvarvning med samma diameter. Den färdiga detaljen jämförs med det utgångsmaterial som CERN tillhandahåller för att se hur mycket av ursprungsmaterialet som avverkas. Avverkningen av ett område delas upp i grov- och finbearbetning där matning och skärhastigheten förändras beroende på vilken slags avverkning som görs. Vid finbearbetning har det tagits hänsyn till de ytfinhetskriterier som måste uppnås enligt ritningen. För att förenkla uträkningen av tillverkningstiden har vi gjort att större hål även görs genom svarvande bearbetning vilket inte görs i praktiken men tillverkningstiden anses inte skilja överdrivet mycket eftersom det är lika mycket material som avverkas i de båda operationerna. Även avrundningar har förenklats genom att göra en avverkning till ett medelvärde mellan den största och den minsta diametern vid avrundningen. Tillverkningstiden som räknas fram har bara tagit hänsyn till när verktyget är i ingrepp med materialet utan positionering. Positioneringstiden och tiden att tillverka mindre hål och gängningsoperationer har sedan tillkommit genom uppskattningar.

Ett program gjordes i MATLAB för att beräkna tillverkningstiden där de olika operationerna delades upp och skärhastighet, matning och operationens längd ansattes. De olika operationerna adderades till en slutlig tillverkningstid. För kaviteten blev denna tid cirka 170 minuter och för stängen i mitten som svetsas på kaviteten blev tillverkningstiden cirka 70 minuter vilket ger en slutlig tillverkningstid  $t_0$  på 240 minuter.

Övriga parametrar som ingår i Ekvation 8 bestämdes genom uppskattningar eller beräkningar enligt följande

I den första termen i kostnadsanalysen ingår seriestorlek  $N_0$ , materialkostnaden  $k_B$ , kassationsandelen  $q_Q$  och materialspillfaktorn  $q_B$ . Eftersom CERN står för materialkostnaden i detta fall tas inte detta med i beräkningarna av kostnaden och därmed blir även  $q_B$  lika med noll. Vidare sätts kassationsandelen till noll eftersom det är en så pass liten serie som ska produceras och eftersom materialkostnaden är väldigt hög innebär det att det inte finns utrymme för att göra fel eftersom då måste det tillverkande företaget stå för materialkostnaden.

I den andra delen av kostnadsformeln ingår maskintimkostnaden under produktion  $k_{CP}$  och taktförlusten  $q_p$ . Taktförlusten sätts till noll eftersom det inte finns några uppmätta resultat över eventuella tidsförluster. Om det senare visar sig att den tiden som har beräknats fram inte räcker till kommer det senare även tillkomma en taktförlust. Tidsförlusterna samlas istället under produktionsstillestånd. Kostnaden  $k_{CP}$  beräknas enligt Ekvation 10 i denna kostnadsformel ingår  $a_f$  och  $N_{ren}$  som beräknas enligt Ekvation 11 respektive Ekvation 12. De olika värdesiffrorna som ingår i de olika formlerna har tagits fram från ett typexempel på underlag för beräkning av maskintimkostnaden och detaljkostnaden där parametrar enligt Tabell 17 används (2). Efter beräkningar blir  $k_{CP}$  697 kr/h och  $k_{CS}$  557 kr/h.

Tabell 17 Typexempel på de olika parametrar som ingår i detaljkostnaden (2).

Parameter	Enhet	Beskrivning
$K_0$	5000 [kKr]	Grundinvestering
$p$	0.07 [-]	Räntefaktorn
$T_{plan}$	1800 [h]	Produktionsplanerad tid (1800h/skift och år)
$h_y$	1800 [h/år]	Antal timmar per skift och år
$n$	10 [år]	Förväntad brukstid i år
$n_{syren}$	5 [år]	Antal skiftår mellan varje helrenovering
$k_{ren}$	0.2 [-]	Renoveringskostnad i förhållande till grundinvestering
$Y$	12 [m <sup>2</sup> ]	Yta knuten till maskinutrustningen
$k_Y$	500 [Kr/m <sup>2</sup> ]	Lokalkostnad per kvadratmeter
$k_{UHh}$	600 [Kr/h]	Underhållskostnad i Kr per timma
$h_{UH}$	40 [-]	Antal driftstimmar per underhållstimme
$k_{ph}$	125 [Kr/h]	Rörlig maskintimkostnad

I den tredje delen ingår stilleståndsandelen  $q_s$  som antas vara 0.5 (50 %) i detta fall och maskintimkostnad vid stillestånd och omställning som beräknas enligt Ekvation 9. En stor del av tiden vid tillverkning antas vara stillestånd som beror på planerade och oplanerade stillestånd. Ställtiden  $T_{su}$  som är ställtiden mellan detalj A och B antas vara 480 min.

I den fjärde och sista delen av kostnadsformeln tar man med lönekostnaden  $k_D$  i beräkningarna, lönekostnaden för en arbetare antas vara 300 kr/h och det behövs minst en arbetare som tillverkar detaljen. Det antas att arbetaren behöver hjälp vid några tillfällen därför krävs det 1.2 personer vid tillverkningen av kaviteten. Lönekostnaden  $k_D$  blir då 360 kr/h. Tabell 18 nedan visar de parametrar som sätts in i kostnadsformeln.

Tabell 18 Parametrar som sattes in i kostnadsformeln.

Parameter	Enhet	Beskrivning
$N_0$	5	[styck] Seriestorlek
$q_Q$	0	[-] Kassationsandel
$q_B$	0	[-] Materialspillfaktor
$q_S$	0.5	[-] Stilleståndsandel
$q_p$	0	[-] Taktförlust
$t_0$	240	[min] Cykeltid
$T_{su}$	480	[min] Ställtid
$k_B$	0	[kr] Materialkostnad
$k_{CP}$	697	[kr/h] Maskintimkostnad under produktion
$k_{CS}$	557	[kr/h] Maskintimkostnad vid stillestånd och omställning
$k_D$	360	[kr/h] Lönekostnad

Kostnaden för att tillverka den yttre delen av kaviteten blev 7061 kr och den inre delen 3771 kr per styck. Denna kostnad kan ses som ett första underlag för hur man bestämmer priset för en detalj det tillkommer fler kostnader som till exempel verktyg- och underhållskostnader, hantering- och lagerhållningskostnader etc. Det kan tänkas i detta fall att en stor del av kostnaden vid tillverkning av kaviteten går åt till att mäta in och fixera detaljerna eftersom yt- och toleranskraven är ytterst viktiga. Det kommer även gå åt en del tid som extra försiktighetsåtgärd med tanke på materialet, oxidfri koppars är svårbearbetat vilket gör det svårare att färdigställa en detalj jämfört med om den hade varit i ett mer vanligt stål. Små serier gör även att kostnaden kommer öka då det med stor sannolikhet tillkommer kostnader för bl.a. fixturer och specialverktyg som är unika för detaljen. Den kostnaden slås ut på färre produkter och därmed ökar kostnaden jämfört med om det hade producerats fler detaljer som tar upp kostnaderna.

---

## 8 Diskussion

Vi hade en hypotes i början där vi trodde att kopparn skulle uppföra sig liknande aluminium men det såg vi snabbt att så inte var fallet. För det första blev skärmotstånden så pass höga att vi trodde ett fel hade begåtts men efter nya tester och även bearbetning av ett redan känt referensmaterial (aluminium) fick vi fram att våra resultat kunde anses stämma.

Oxidfri koppar och niob har visat sig vara svårbearbetade material, många av de svårigheter som har nämnts i litteraturstudien har även uppstått under våra experiment som till exempel adhesion av spånor på ursprungsmaterialet och problem med spånbrutning. Ett av de största problemen är just problem med spånbrutningen eftersom spånbrytare på skärverktygen inte har visat sig vara effektiva. Oftast blir spånorna långa och kontinuerliga, med en högre matning packas spånorna mer jämfört med en lägre matning, se Figur 25. Adhesion av spånor uppstår då de kontinuerliga spånorna trasslar in sig antingen runt verktyget eller runt arbetsmaterialet. Utifrån de tester vi utförde med olika skärverktyg visade det sig att PCD fick minst adhesion av spånor för OFC. Detta kan ha att göra med den obefintliga spånbrytaren på verktyget men också att den har en vass egg.

Skärmotståndet blev så pass högt att det såg ut som vi hade bearbetat rostfritt stål. Under processen kunde vi tydligt se hur maskinen fick kämpa när materialet började packas på skäret och vi fick ingen direkt spånbildning då. En varierande hårdhet av materialet gör också att skärkrafterna varierar mycket då man har ett abrasivt material.

Utifrån resultaten kan man med fördel använda Wiperskär istället för vanliga skär för OFC. Skärkrafterna blir ungefär de samma medan ytfinheten blir bättre. Nu vet vi inte om det har att göra med att vi har en mindre spånvinkel för Wipern jämfört med HMO. Enligt litteraturstudien har spånvinkeln stort inflyttande på krafterna så tyvärr kan vi inte säga att Wipern blir bättre men i vårt fall blev det så.

Vid ett tillfälle gjordes ytterligare test för PCD-verktyget på samma provstav som det hade gjorts tidigare. Testet utfördes efter att provstaven hade svarvats ner 10 mm, det visade sig att ytfinheten blev annorlunda för vissa av testen, oftast sämre än tidigare men även i samma intervall. Anledningen till detta kan bero på avvikelser i materialet eftersom det bl.a. har bearbetats genom smidning. Avvikelserna i materialet syntes även under hårdhetstesterna då hårdheten kunde variera en hel del mellan olika områden.

Vändskäret HMB kan vi inte rekommendera på de låga matningarna eftersom ytan blir så pass dålig. Däremot kan den möjligen hålla bättre mot förslitning men då vid grovbearbetning.

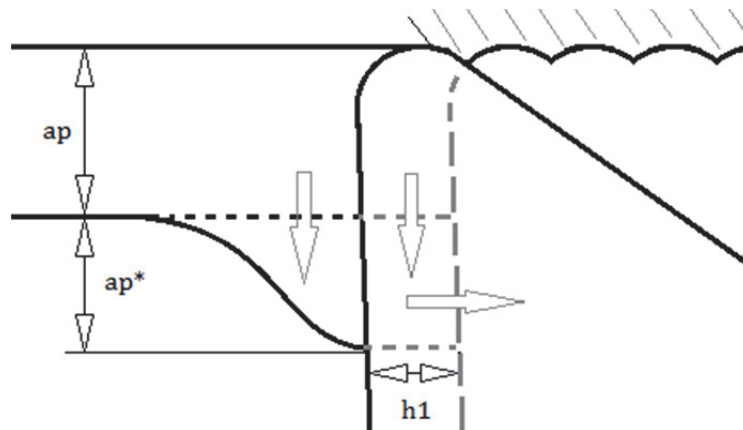
Det verktyget som visade bäst resultat under ytfinhetstesterna för nioben visade sig vara verktyget med en nosradie på 1.2 mm. Vilket var väntat med tanke på att en större nosradie ger finare yta.

Vid bearbetning av OFC och niob bildas en grad framför verktyget som bara växer med ingreppstiden. Gemensamt för de båda materialen är att de är väldigt duktila och består endast av ett grundämne utan andra legeringsämnen.

Under ytfinhetstesterna syntes detta genom att de stickspår som hade gjorts som en avgränsning mellan testerna hade fyllts igen till en viss del av överflödigt material.

---

Vid skärkraftsmätningar observerades höga skärmotstånd för nioben, likaså kopparna. En teori bakom varför skärmotstånden blir så höga är den kraftiga gradbildningen. Det duktila materialet pressar mjukt material framför sig, vilket kan illustreras i Figur 55. Det byggs på material framför skärverkygets ställvinkelsida, som resulterar i ökat skärdjup. Detta fenomen har vi låtit kalla för ”dubbla  $a_p$ ” och innebär att det ursprungliga skärdjupet adderas med gradbildningsskärdjupet  $a_p^*$ , enligt Figur 55.



Figur 55 Dubbla  $a_p$  vid skärander bearbetning av duktila material.

Med ett ökat skärdjup, som då fås i detta fall, kommer skärkrafterna att öka. När beräkningar görs på fall utan hänsyn till  $a_p^*$  kommer skärmotståndet att bli oförtjänt högt. Nämnaren i Ekvation 3 blir mindre än vad den egentligen är eftersom  $b_1$  växer under processen.

Gradbildningen syntes inte under bearbetning av PCD vilket kan ha att göra med att skärdjupet endast var 0,2 mm, det kan också ha att göra med verktygsgeometrin och en skarpare egg på PCD-verktyget. Den höga huvudskärkraften leder i sin tur till att skärmotståndet blir mycket högre för hårdmetall än för PCD-skären.

Lösning på detta kan göras med minskad ställvinkel  $\kappa$ . Då blir ”dubbla  $a_p$ ” inverkan mindre eftersom minskad ställvinkel ger större bredd  $b_1$ , men detta har inte testats än.

Duktiliteten ställer till stora problem för bearbetningen. Vid vissa tillfällen byggs det på enorma lösegg som transporteras bort med spånorna. Ett exempel på detta kan ses i Figur 26. Det observerades under löseggbildningen att maskinen fick kämpa på rejält och att effektbehovet stegrade. Under detta fenomen bearbetar man inte längre med skärverkygets skärepp utan det deformationshårdnande materialet framför är det som skär. Det innebär att man inte längre har koll på vilka vinklar som har ändrats. Vid lösseggsbildning kommer bland annat spånvinkeln att ändras till en högre vinkel, vilket är gynnsamt för duktila material, men konsekvensen blir en trubbigare skärepp.

---

## LITTERATURFÖRTECKNING

---

1. **Ståhl, Jan-Eric.** *Metal Cutting - Theories and models.* Lund : Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2012.
2. —. *Industriella Tillverkningsystem del II -Länken mellan teknik och ekonomi.* Lund : Lund: Avdelningen för Industriell Produktion, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, 2011.
3. **Xu, L., Schultheiss, F., Andersson, M. and Ståhl, J-E.** *General conception of plar diagrams for the evaluation of the potential machinability of workpiece materials.* u.o. : Accepted to international Journal Machining and Machinability of Materials, 2012.
4. *Cost-Effective Manufacturing Machining Brass, Copper and its Alloys.* u.o. : Copper Development Association, 1992. Publication TN 44.
5. **S.Kuyucak, M.Sahoo.** *A review of the machinability of copper-base alloys.* Ottawa : Elsevier Science Ltd, 1994. Vol. 35.
6. **M.A Staley, E.F. Smart and M.L.H. Wise.** *The Machining of high conductivity coppers, Incra project No.343A.* Birmingham : International Copper Research Assoc., 1984. Vol. 35.
7. **E.M. Trent, P.K. Wright.** *Metal Cutting.* 4. u.o. : Elsevier, 2000.
8. European standard EN 13604. u.o. : European Committee for Standardization, 2012.
9. American standard ASTM B 170. u.o. : ASTM International, 2012.
10. **Davis, J.R.** *ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys.* Ohio : ASM International, 2001. ss. 264-275. 0-87170-726-8.
11. **L. Lu, Y. Shen, X. Chen, L. Qian, and K. Lu.** *Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper.* u.o. : Science, 2004. ss. 422-426. Vol. 304.
12. **Callcut, Vin.** [Online] Copper Development Association Inc., September 2006. [Citat: den 06 07 2012.] [http://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2006/09/high\\_cu\\_alloys.html](http://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2006/09/high_cu_alloys.html).
13. **G. Lanza, S.Calatroni, L. Marques Antunes Ferreira, A. Gustafsson, M.Pasini, P.Trilhe, Palmieri Vincenzo.** *The HIE-Isolde superconducting cavities: Surface treatment and niobium thin film coating.*
14. **Aicheler, Markus.** *Surface phenomena associated with thermal cycling of copper and their impact on the service life of particle accelerator structures.* Bochum : u.n., 2010.
15. **Moriwaki, Toshimich.** *Machinability of Copper in Ultra-Precision Micro Diamond Cutting.* Kobe : Kobe University and Koichi Okuda, Kobe Technical College, 1989.
16. *Modern Skärande Bearbetning.* Sandviken : Sandvik Coromant, 1995. 91-972299-1-1.
17. Niob 101. [Online] IAMGOLD Corporation, den 03 08 2012. <http://www.iamgold.com/English/Operations/Operating-Mines/Niobec-Niobium-Mine/Niobium-101/default.aspx>.
18. **W.Bauer.** *Fabrication Of Niob Cavities.* Karlsruhe : Institut für Kernphysik, 1980.
19. Machining Niob. [Online] ESPI Metals, den 02 08 2012. <http://www.espimetals.com/index.php/technical-data/171-Niobium-Machining>.
20. *ATI Niob – Machining & Forming Operations, Technical Data Sheet.* 1. u.o. : ATI, 2011.

- 
21. **A. Schmidt, A. Brinkmann, J. Iversen, A. Matheisen, D. Reschke, M. Schäfer, W. Singer, V. Sousa, J. Tiessen, D. Vermeulen.** *1.3 GHz Niob Single-Cell Fabrication Sequence.* Hamburg : DESY, 2010.
22. **R.A. Graham, R.C. Sutherlin.** *Niob and niob alloys in corrosive applications.* Albany : Wah Chang.
23. **C.Z. Antoine, M. Foley, N. Dhanaraj.** *Parameters for machining niob at FNAL.* 2006.
24. [Online] ETA FILM Technology Inc., den 18 01 2013.  
[http://www.etafilm.com.tw/PVD\\_Sputtering\\_Deposition.html](http://www.etafilm.com.tw/PVD_Sputtering_Deposition.html).
25. **Eppinger, K. Ulrich & S.** *Product Design and Development.* 4th. u.o. : McGraw-Hill International Editions, 2008.
26. Nordic Brass. [Online] Outokumpu, den 28 06 2012.  
<http://www.nordicbrass.se/LinkClick.aspx?fileticket=QLMX1EW1bCs%3D&tabid=73&mid=410&language=sv-SE>.



---

## Bilaga 1

Benämning	TX191
Deformation yttre räcksmede	Hög
Deformation centrum räcksmede	Hög
Temp verktyg start smide (medel) (°C)	70
Temperatur göt (ur ugn) (°C)	798
Temperatur ugn (°C)	836
Temp verktyg insida (slut smide) (°C)	250
Temp verktyg utsida (slut smide) (°C)	80
Temp lockämne (slut smide) (°C)	340
Antal slag yttre räcksmede	8
Antal slag centrum räcksmede	68
Tid stukprocess (s)	85
Tid yttre räcksmede (s)	81
Tid centrum räcksmede (s)	319
Total tid räcksmede (s)	400
Total smidestid (s)	539

---

## Bilaga 2

6° spånvinkel

Skärhastighet (m/min)	Huvudskärkraft (N)	Matningskraft (N)
100	900	400
200	780	350
300	750	370
400	720	320

25° spånvinkel

Skärhastighet (m/min)	Huvudskärkraft (N)	Matningskraft (N)
100	400	80
200	380	80
300	360	70
400	370	90

45° spånvinkel

Skärhastighet (m/min)	Huvudskärkraft (N)	Matningskraft (N)
100	260	~0
200	275	~0
300	275	~0
400	290	~0

---

Side rake	6°, 25°, 45°
Back rake	0°
End relief	10°
Side relief	6°
End cutting edge	12,5°
Side cutting edge	0°
Nose radius	0,125 mm
Matning	0,2 mm/rev
Skärdjup	1,5 mm
Skärhastighet	25-400 m/min

---

## Bilaga 3

	Snabbstål	Hårdmetall	Diamant
Grovbearbetning			
Skärhastighet (m/min)	22-45	75-180	
Matning (mm/varv)	0.4-1.0	0.4-0.75	
Skärdjup (mm)	1-3	1.1-3	
Finbearbetning			
Skärhastighet (m/min)	22-45	90-240	300-800
Matning (mm/varv)	0.15-0.5	0.2-0.4	0.05-0.15
Skärdjup (mm)	0.4-0.75	0.4-0.75	0.1-0.3

Vid bearbetning av kopparlegeringar med Compax Diamond så används vanligen lutningsvinklar mellan +10° och +20° samt spånvinklar mellan +5° och +20° (4).

Rekommenderad skärdata för svarvning av OFC (26):

	Snabbstål	Hårdmetall	Diamant
Grovbearbetning			
Skärhastighet (m/min)	30-90	150-	90-
Matning (mm/varv)	0.4-1	0.4-0.8	0.1
Skärdjup (mm)	1-3	1-3	0.3
Finbearbetning			
Skärhastighet (m/min)	30-90	200-	200-
Matning (mm/varv)	0.08-0.4	0.12-0.4	0.05
Skärdjup (mm)	0.4-0.8	0.4-0.8	0.02-0.3

---

I tabellen nedan visas skär- och matningshastigheter (10).

Verktygsmaterial	Skärhastighet (m/min)	Matning vid grovbearbetning ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	Matning vid finbearbetning ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )
HSS	23-46	51-203	51-76
Karbid	92-152	51-203	51-76

	Släppvinkel ( $^{\circ}$ )	Spånvinkel ( $^{\circ}$ )	Spånbrytarvinkel ( $^{\circ}$ )
Snabbstål	25	8	50
Hårdmetall	20	6	50

I tabellen nedan är de olika inställningsvinklarna listade för snabbståls- och karbidskär vid bearbetning av OFC koppar (10).

	HSS	Carbide
Back rake	10-20 $^{\circ}$	4-8 $^{\circ}$
Front clearance	10-15 $^{\circ}$	7-10 $^{\circ}$
Side rake	20-30 $^{\circ}$	15-25 $^{\circ}$
Side clearance	10-20 $^{\circ}$	7-10 $^{\circ}$
Lead angle	15 $^{\circ}$	10-15 $^{\circ}$

---

## Bilaga 4

Skärdata för niob baserad på litteraturstudie.

Cutting tool	Cutting speed (m/min)	Feed roughing (mm/rev)	Feed finishing (mm/rev)	Depth of cut, roughing (mm)	Depth of cut, finishing (mm)
HSS	20-25	0,2-0,3	0,01-0,125	0,75-3,0	0,03-0,40
Carbide	75-90				

Cutting tool	Approach angle	Side rake	Side and end clearance	Plan relief angle	Nose radius (mm)
HSS/Carbide	15-20	30-35	5	15-20	0,5-0,75

Hastighet (mm/min)	Verktymsmaterial	Matningshastighet mm/varv nominell håldiameter			
(mm)	ISO	1.5 (mm)	3 (mm)	6 (mm)	12 (mm)
15	S9, S11	0.025			
24	S9, S11		0.075	0.13	0.18