



LUNDS UNIVERSITET
Lunds Tekniska Högskola

Skärbarhetsanalys av ISO-grupperade
arbetsmaterial
– Med fokus på skärkraftsmodellering.

Albin Engqvist Mikael Linde

2015

Institutionen för Maskinteknologi
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

FÖRORD

Examensarbetet har genomförts på Institutionen för Maskinteknologi Industriell Produktion LTH vid Lunds universitet. Examensarbetet påbörjades som en del av ett uppdrag från Seco Tools som sökte uppdaterade materialkonstanter för beräkning av skärmotstånd och specifik skärkraft i deras system för skärdata rekommendation SMG version 2. Examensarbetet utvecklades att inkludera en vidare vy av skärbarheten hos totalt 16 olika material.

Ett särskilt tack riktas till följande personer, som har bistått med värdefull information och vägledning genom hela arbetet.

- Professor Jan-Eric Ståhl, avdelningen för industriell produktion LTH
- Tekn.dr. Fredrik Schultheiss, handledare vid avdelningen för industriell produktion LTH
- Professor Jinming Zhou, avdelningen för industriell produktion LTH
- PhD. Volodymyr Bushlya, avdelningen för industriell produktion LTH
- PhD. Oleksandr Gutnichenko, avdelningen för industriell produktion LTH
- Civilingenjör Daniel Johansson, avdelningen för industriell produktion LTH

Samt Seco Tools som bistått med arbetsmaterial och verktyg.

Lund, mars 2015

Mikael Linde och Albin Engqvist

SAMMANFATTNING

Examensarbetet har genomförts på Institutionen för Maskinteknologi Industriell Produktion LTH vid Lunds universitet. Examensarbetet påbörjades som en del av ett uppdrag med utgångspunkt i att söka nya materialkonstanter för beräkning av skärmotstånd och specifik skärkraft i ett system för rekommendation av skärdata. Examensarbetet utvecklades att inkludera en vidare vy av skärbarheten i totalt 16 olika material.

Målet med examensarbetet är att kartlägga skärbarheten för 16 material; stål, rostfritt stål, gjutjärn, mässing, titan och Inconel, som skall representera en stor del av arbetsmaterialen som används i industrin.

Rapporten inleds med en genomgång av teorin om svarvning och kraftbilden vid svarvning, arbetsmaterialen och faktorer som påverkar skärbarheten studeras. Det följs av avsnitt om verktygslivslängd och utvecklingen av Taylors ekvation till Coldings ekvation. En modell för att bestämma konstanten Cr_1 som funktion av materialegenskaper undersöks. Konstanten Cr_1 är en av två konstanter som används för att beräkna skärmotstånd.

I försöken beräknas konstanterna för skärmotstånd genom att använda matnings-trappor där all skärdata förutom matningen hålls konstant, för att på så vis få fram skärkraften som funktion av ekvivalent spåntjocklek. Modellen för Cr_1 som funktion av materialparametrar beräknas för våra material och jämförs med resultatet ifrån statiska skärkraftsförsöken.

För sex material så mäts även dynamiska krafter, där kraftens variation i tiden mäts för att få en förståelse för variationsfaktorer och segmenteringsfrekvens.

Då livslängdstester kräver en stor mängd arbetsmaterial så begränsas det testet till att inkludera ett material. Konstanter till Coldings ekvation beräknas och resultatet presenteras i Colding- och Taylorplanet.

I slutsatsen så rangordnas de testade arbetsmaterialen efter Cr_1 som kommer att utgöra den generella rankingen för skärbarhet, slutsatser dras efter materialsammansättning och beståndsdelar och avvikelser från teorin analyseras.

ABSTRACT

This master thesis has been carried out at the division of Production and Materials Engineering at the Department of Mechanical Engineering University of Lund. The thesis was initiated as a part of a project at Seco Tools to establish new material constant for their SMG version 2. The thesis came to include a broader view on the machinability of a total of 16 materials. The objective of the thesis is to analyze the machinability of 16 different materials including steel, stainless steel, cast iron, brass, titanium and Inconel to represent a wide spectrum of materials used in today's industry.

The report starts out with theory about metal cutting specifically on turning and forces during turning as a small introduction to the reader, also theory about the workpiece materials and what factors influence the machinability of a material is described. That is followed by a chapter on tool life and theory about Taylor's equation and the development of Colding's equation and factors effecting tool life.

The constants for the cutting resistance and specific cutting force were determined for each of the 16 materials. The method used was feed steps; all cutting data is held constant except feed which is increased in steps to be able to determine force per equivalent chip thickness. Also a model to determine the Cr1 constant as a function of work piece material parameters is studied and compared to the values obtained in the experiments measuring static forces.

Dynamic force measurements were carried out in six different materials to get a comprehension of variation factors and segmentation frequencies.

A tool-life test according to Colding's method is carried out to study the factors involving tool wear.

The results are presented and the work piece materials are ranked in machinability by their Cr1 value which is influenced mainly by material properties. Conclusions are drawn on the order of machinability and deviations from our original thesis.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord.....	i
Sammanfattning.....	ii
Abstract	iii
1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Problemformulering.....	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Företagsbeskrivning.....	2
1.5 Metodik.....	2
1.6 Val av metod	2
1.6.1 Motivering av metodval	3
1.6.2 Validering och Verifiering.....	3
2 Teori	4
2.1.1 Svarvning.....	4
2.2 Krafter.....	6
2.2.1 Statiska Skärkrafter	8
2.2.2 Dynamiska Skärkrafter.....	12
2.3 Verktygsgeometri	15
2.3.1 Eggradie, $r\beta$	16
2.3.2 Verktygsmaterial.....	17
2.4 Verktyglivslängd.....	21
2.4.1 Coldings ekvation	22
2.5 Arbetsmaterial	24
2.5.1 Indelning av arbetsmaterial	24
2.5.2 Materialgrupp P	24
2.5.3 Materialgrupp M.....	27
2.5.4 Materialgrupp K.....	29
2.5.5 Materialgrupp N.....	30
2.5.6 Materialgrupp S	31
2.6 Skärbarhet	33
2.6.1 Materialfaktorer	33

2.6.2	Metodik vid framtagning av polärddiagram	39
2.7	Cr_1 som funktion av materialets egenskaper	43
3	Resultat	44
3.1	Arbetsmaterial	44
3.1.1	Materialgrupp P	44
3.1.2	Materialgrupp M	49
3.1.3	Materialgrupp K	52
3.1.4	Materialgrupp S	54
3.1.5	Materialgrupp N	56
3.2	Statiska skärkrafter	58
3.2.1	Skärmotstånd och Specifik skärkraft: Konstanter	58
3.2.2	Mätdata Validering	65
3.2.3	Plastisk deformation	66
3.3	Dynamiska Skärkrafter	68
3.4	Jämförelse mellan Cr_1 och modellerade Cr_1	72
3.5	Verktygförlitning	73
4	Slutsatser	76
4.1	Skärmotstånd eller specifik skärkraft	76
4.2	Statiska Skärkrafter	80
4.2.1	Materialgrupp N	81
4.2.2	Materialgrupp K	81
4.2.3	Materialgrupp P	81
4.2.4	Materialgrupp M	82
4.2.5	Materialgrupp S	82
4.2.6	Cr_1 och k_{c11} för alla skär i ett material	83
4.3	Dynamiska Krafter	84
4.4	Cr_1 som funktion av material parametrar	85
4.5	Coldings Verktygslivslängd	86
5	Kommentarer	87
6	Förslag på vidare studier	88
7	Referenser	89
8	Appendix	93
8.1	Appendix A Materialegenskaper	93
8.2	Appendix B Abrasivitet	94

8.3	Appendix C Statiska Skärkrafter Diagram.....	98
8.4	Appendix D Statiska Skärkrafter Konstanter	103
8.5	Appendix F Dynamiska Skärkrafter	107

1 INLEDNING

I Inledningen presenteras det som ligger till grund för rapporten. Problemet formuleras och metodiken beskrivs, även de avgränsningar som gjorts redogörs.

1.1 Bakgrund

I detta projekt studeras kraftbilden som uppkommer vid svarvning för att undersöka arbetsmaterial och svarvskärets egenskaper och hur de påverkar skärbarheten för ett material. Både statiska och dynamiska kraftmätningar kommer att utföras, samt materialstudier.

Projektet utformas delvis på uppdrag av Seco Tools som söker uppdaterade värden för skärmotstånd för en uppdatering av deras system för rekommendationer av skärdata för olika arbetsmaterial SMG v2. 16 material ska klassificeras i majoriteten av Secos materialklasser, ett antal skär kommer användas för varje material.

Studier på materialstruktur, nano-hårdhetstester och insamlad materialdata för alla material utförs för att försöka finna samband och identifiera variabler som påverkar skärbarheten.

Ett arbetsmaterials skärbarhet utvärderas i termer av verktygsförslitning, ytfinheten av bearbetad yta, uppkomna krafter och spånans form. I rapporten kommer fokus att ligga på studier av arbetsmaterialet och kartläggning hur olika materialparametrar påverkar kraftbilden och verktygsförslitning.

1.2 Problemformulering

Skärbarheten beskriver hur lätt eller svårt ett material bearbetas. Rapporten ämnar kartlägga skärbarheten för 16 olika material samt analysera faktorer som påverkar skärbarheten. Att kunna beskriva ett materials skärbarhet är viktigt vid val av verktyg och skärdata i bearbetningsprocessen. Skärbarhet diskuteras och undersöks i termer av uppkomna bearbetningskrafter samt verktygsförslitning.

1.3 Avgränsningar

Rapporten avgränsas till 16 olika material och ett antal skärverktyg med operationsområde inom materialgruppen. Om en fullständig kartläggning skall göras krävs mer tid samt material än vad som är tillgängligt inom ramen för detta projekt. Livslängdstester begränsas till att experimentellt utföras i ett material då testerna kräver mycket arbetsmaterial och tid.

1.4 Företagsbeskrivning

Seco Tools har sitt ursprung i Fagersta Bruks AB, Fagersta Bruk bildas år 1873 men har anor från 1600-talets början. Seco Tools separeras från Fagersta AB 1974 och är idag en av världens största tillverkare av vändskärsverktyg. Seco Tools tillverkar och säljer idag verktyg för en mängd olika applikationer såsom svarvning, fräsning, borrar och gängning. Ett flertal företag förvärfvas världen över och i slutet av 00-talet har Seco Tools 50 helägda bolag och finns i mer än 60 länder [1].

1.5 Metodik

Arbetsgången i föreliggande arbete är uppdelat i följande steg:

1. Projektuppgiftsbyggnad.
2. Insamling av teori.
3. Insamling av experimentell data.
4. Beräknings och analys av resultat.
5. Slutsats.

1.6 Val av metod

Projektet inleddes med diskussioner med Professor Jan-Eric Ståhl om mål med projekt samt genomförande. Det följdes upp med teori- och litteraturstudier om materials skärbarhet i synnerhet teori om svarvning och materialstruktur.

Vid inhämtning av experimentell data för de olika materialen så svarvades matningstrappor. Matningstrappor innebär att all skärdata hålls konstant förutom matningen. Matningen ökas inom applikationsområdet för skäret och begränsas framför allt av kraftgivaren från Kistler som har en begränsning på 5000 N i huvudskärriktningen. Matningstrapporna exporteras från Labview till Matlab där genomsnittskraften för de olika matningarna tas fram. Genomsnittskrafterna används sedan för att bygga upp matriser i MathCad där sedan konstanterna räknas ut med hjälp av minsta kvadratmetoden.

Ett skärverktygs livslängd beräknas med hjälp av Coldings ekvation. Ett antal punkter med varierande skärdata tas fram som spänner upp ett område inom vilket vi kan avgöra ett verktygslivslängd för vald skärdata.

Dynamiska krafter mättes med en annan kraftgivare utvecklad på Lunds Tekniska Högskola med en samplingsfrekvens på 100 kHz för att fånga dynamiska variationer såsom segmentbildning.

Materialprover tas ur arbetsstycket för att sedan poleras och etsas för att möjliggöra studier och dokumentation av materialstrukturen. Sedan polerades de återigen och nano-hårdhetstester genomfördes för att studera hårdhet och fördelningen av hårda partiklar i materialen för att avgöra abrasiviteten på arbetsmaterialet.

Skärets geometri analyseras med ett optiskt mikroskop från Alicona som har möjligheten att bygga upp tredimensionella modeller av skären. Sedan kan tvärsnitt tas ut som möjliggör mätning av eggradie och diverse vinklar.

1.6.1 MOTIVERING AV METODVAL

Litteraturstudien genomfördes för att få insikt i existerande teorier och modeller för beräkning och analys av skärbarheten av olika material. Studien innefattar en betydande del av arbetet då det står för grundstommen av analysen.

Vi valde matningstrappor som metod för att få fram skärtekniskdata, då det är en allmänt vedertagen metod för att ta fram konstanterna som beskriver skärmotstånd. Tillgång till en styv NC-svarv och en Kistlervivare var nödvändigt för datainhämtningen. Det antal material och skär som användes i testerna valdes för att fånga ett så brett spektrum av arbetsmaterial som används i produktion. Arbetsmaterial och skärverktyg bistod Seco Tools och Industriell Produktion LTH med.

Dynamiska kraftmätningar utfördes för att få en mer komplett förståelse över kraftbilden och dynamiska faktorer så som segmentbildningskaraktäristik och variationstal.

Analys av skärets geometri möjliggjordes av tillgång till optiska mikroskopet från Alicona. Mikroskopet är i grunden ett vanligt optiskt mikroskop med möjlighet att ta många bilder i lager för att bygga upp en tredimensionell modell av ytan. Begränsningar för vanliga optiska mikroskop gäller, det vill säga ytan måste vara synlig, så att för små vinklar eller områden med för hög eller låg reflektion återskapas dåligt.

Valet av programvara gjordes på grund av det fanns kompetens och tillgängliga licenser för valda programvara samt beprövade modeller för en del av analysen.

Försök för att bestämma konstanterna till Coldings ekvation gjordes för att få viss kunskap i hur skärets utslitningsprocess ser ut. Den stora materialåtgången vid utslitningstester begränsade oss till ett arbetsmaterial.

1.6.2 VALIDERING OCH VERIFIERING

För att validera mätdata ifrån våra statiska skärkraftsförsök, så utförs 25 identiska försök i ett och samma material. Uppmätta krafter spridning analyseras för att uppskatta noggrannheten på våra mätningar. I den övriga testserien så kommer tre identiska försök att utföras för att säkerställa att värdena är inom rimlig avvikelse ifrån varandra.

Verifiering av framtagna modeller och tillhörande konstanter görs genom jämförelse av experimentellt uppmätta krafter och modellerade krafter. Modellfelen kommer att presenteras jämsides övriga resultat.

Vid mätning av eggradie så finns inbyggd mjukvara för mikroskopet ifrån Alicona där avvikelsen på ett antal mätningar presenteras som möjliggör validering.

2 TEORI

I detta kapitel går vi igenom teorin som används i analysen och utformning testerna. Teorin har hämtats in genom läroböcker, artiklar samt diskussioner med handledare och övrig personal på industriell produktion LTH. Kapitlet är tänkt att ge läsaren en överblick över skärtekniska begrepp och teorin bakom våra experiment och analys.

2.1.1 SVARVNING

Vid svarvning är arbetsstycket inspänt mellan chuck och en dubb, svarvning utan dubb förekommer också vid korta arbetsstycken samt vid till exempel ändplaning. Arbetsstycket roterar och skärverktyget är fast, material avverkas genom att stagnationspunkt uppstår mellan skärelegg och arbetsmaterial vilket möjliggör spånbildning.

2.1.1.1 Skärhastighet, v_c

Skärhastigheten v_c vid svarvning är definierat som periferihastigheten på arbetsstycket enhet [m/min]. Mer generellt för skärandebearbetning så är skärhastigheten den relativa hastigheten mellan skärverktyget och arbetsstycket.

2.1.1.2 Skärdjup, a_p

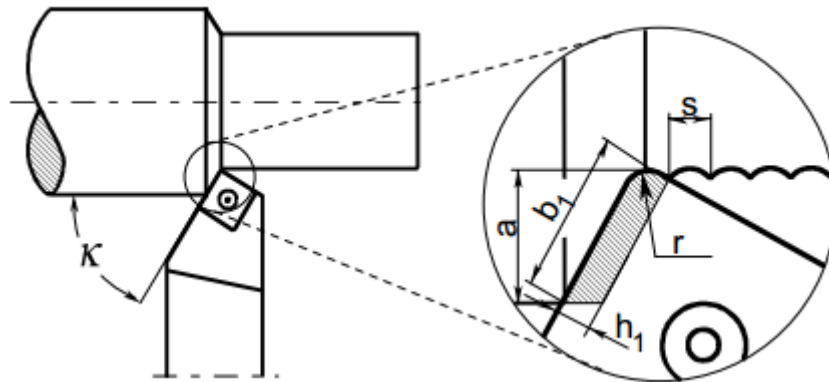
Skärdjupet a_p vid längdsvarvning är den sträcka radiellt som skäret sticker in i arbetsstycket, enhet [mm].

2.1.1.3 Matning, f

Matningen f är den sträcka per rotation som skäret förflyttar sig i axiell eller radiell riktning, enhet [$mm/varv$]. Mer generellt den relativa rörelsen mellan skärverktyg och arbetsstycke per tidsenhet.

2.1.1.4 Spåntjocklek och spåntjockleksparametrar, h_x

Spåntjockleken diskuteras i termer deformerad och odeformerad, samt olika approximationer av dem. Den odeformerade spåntjockleken kan approximeras som $h_1 \approx f \cdot \sin(\kappa)$, där κ är ställvinkeln och f är matningen.



Figur 1 Skärvinkel κ och teoretisk spåntjocklek h_1 [2].

Eftersom spåntjockleken inte är konstant längs egglinjen approximerar Woxén [3] den odeformerade spåntjockleken som:

$$h_{ew} = \frac{A_w}{l_w} = \frac{a_p \cdot f}{\frac{a_p - r_\epsilon(1 - \cos(\kappa))}{\sin(\kappa)} + \kappa \cdot r + \frac{f}{2}} \quad \text{Ekvation 1}$$

Där A_w är arean av spånan, l_w skärkantslängden, r är nosradien, κ är ställvinkeln. Woxéns approximation av den odeformerade spåntjockleken kommer att användas i vår analys.

2.1.1.5 Spånbredd b_1

Den teoretiska spånbredden b_1 är avståndet vinkelrät mot spåntjockleken. Den teoretiska spåntjockleken är: $b_1 \approx \frac{a_p}{\sin(\kappa)}$, det kan noteras att om ställvinkeln $\kappa = 90^\circ$ så är spånbredden lika med skärdjupet.

2.2 Krafter

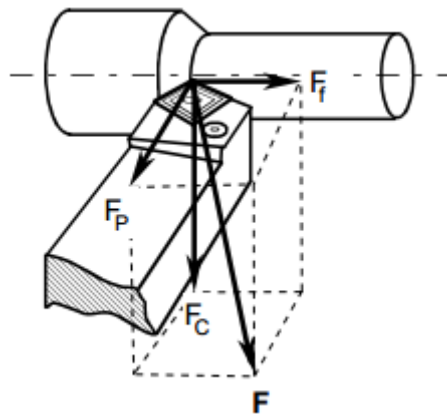
Skärkrafter kan beskrivas i termer om statisk eller dynamisk karaktär. De statiska skärkrafterna är medelvärdet av skärkrafterna under en tidsperiod. De dynamiska skärkrafterna är beroende av tiden och beskriver även variationer i krafterna som mestadels beror på arbetsmaterialet.

Vid svarvning har vi följande kraftkomponenter:

F_c = Tangentialkraft (huvudskärkraft)

F_f = Axialkraft (matningskraft)

F_p = Radialkraft (passivkraft)



Figur 2 Kraftkomponenter [3].

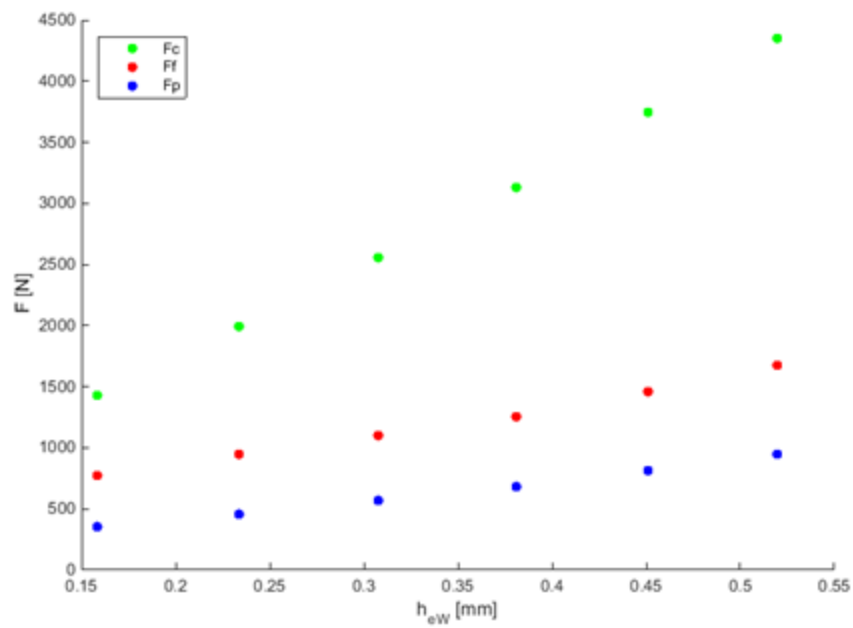
De tre kraftkomponenterna bildar den resulterande kraften med magnituden:

$$F = \sqrt{F_p^2 + F_c^2 + F_f^2} \quad \text{Ekvation 2}$$

Effekten vid svarvning blir således:

$$P = F \cdot v = F_c \cdot v_c + F_p \cdot v_p + F_f \cdot v_f \approx F_c \cdot v_c \quad \text{Ekvation 3}$$

Huvudskärkraften är störst i magnitud och bestämmer tillsammans med skärhastigheten effekten $P = F_c \cdot v_c$. Radialkraften F_p är minst men det är den som orsakar dimensionsfel och vibrationer i processen. Matningskraften F_f är större än F_p men orsakar mindre problem och tappar därför i betydelse för analysen.



Figur 3 Krafter för verktyg 5 skär i material SS 2244 som funktion av ekvivalent spåntjocklek h_{eW} enligt Woxén [3].

2.2.1 STATISKA SKÄRKRAFTER

Olov Svahn definierade i sin avhandling ”Machining Properties and Wear of Milling Cutters” [4] kraften i skärriktningen som:

$$P = a \cdot l + n \cdot A \quad \text{Ekvation 4}$$

Grunden för sambandet enligt Ekvation 4 är hämtad från tidigare arbetet av Woxén [3]. Där konstanterna a och n beskriver den specifika spånsepareringskraften och den specifika spånformeringskraften respektive.

Genom att dividera Ekvation 4 med spånarean A erhålls skärmotståndet Cr .

$$Cr = \frac{P}{A} = \frac{a \cdot l + n \cdot A}{A} = n + \frac{a}{h_e} = Cr_1 + \frac{Cr_2}{h_e} \quad \text{Ekvation 5}$$

Kvoten l/A i Ekvation 5 kan identifieras som det inverterade värdet av den ekvivalenta spåntjockleken h_{ew} eller som generellt kan betecknas som h_c . I detta sammanhang bör det påpekas att kvoten l/A benämndes av Woxén [3] som spånequivivalenten betecknad q .

Ingemar Johansson 1967 [5] har infört sambandet enligt Ekvation 6, vilket fått en god spridning vid landets högskolor.

$$k_s = k_1 + \frac{k_2}{h_1} \quad \text{Ekvation 6}$$

Johanssons specifika skärkraft erhålles genom att dividera Woxén-Svahns uttryck med spånarea $A = b \cdot h_1$ för att beskriva funktions sambandet mellan specifik skärkraft och nominella spåntjockleken. Parametern b är en fiktiv storhet som erhålles genom att dividera spånarean $A = f \cdot a_p$ med den maximala teoretiska spåntjockleken h_1 . Johansson anförde vidare att en approximation av den specifika skärkraften återges bättre av en hyperbel än en exponentiell funktion eftersom det existerar en kraft som är oberoende av den nominella spåntjockleken som verkar på eggens släppningssida.

Den exponentialfunktion som Johansson diskuterar introducerades av Kienzle 1952 [6]. I denna modell är den specifika skärkraften är en exponentiell kurvanpassning och beskrivs med två konstanter $k_{c1.1}$ och m_c .

$$k_c = \frac{F_c}{A} = \frac{b \cdot k_{c1.1} \cdot h_{ew}^{1-m_c}}{b \cdot h_{ew}} = k_{c1.1} \cdot h_{ew}^{-m_c} \quad \text{Ekvation 7}$$

Därtill så kan med andra beteckningar skärkraften i de tre olika riktningarna beskrivas av:

$$\begin{aligned} F_c &= C_2 + C_1 \cdot h_1 \\ F_f &= D_2 + D_1 \cdot h_1 \\ F_p &= E_2 + E_1 \cdot h_1 \end{aligned} \quad \text{Ekvation 8}$$

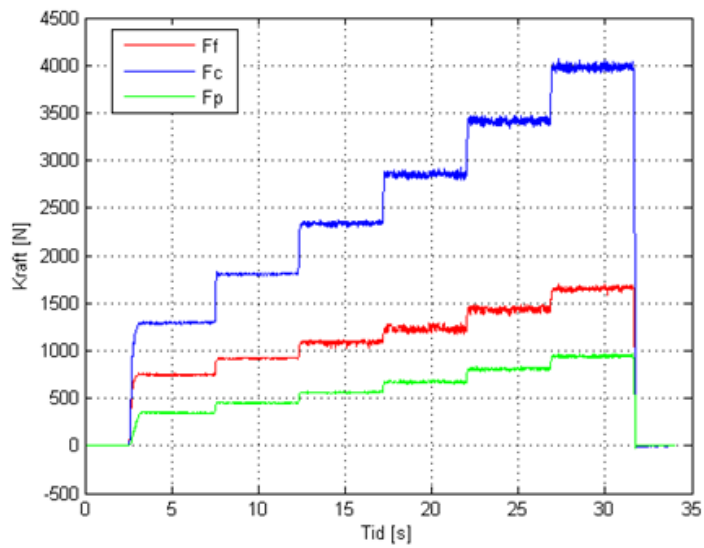
Uttrycket skärmotstånd återintroducerat av Ståhl [7] som menar att uttrycket först introducerades av Hök [8] beskriver fundamentalt samma sak som specifik skärkraft det vill säga skärkraft per total spånarea som arbetsmaterialet uppvisar. Det statistiska skärmotståndet:

$$Cr = \frac{F_c}{A} = \frac{C_2 + C_1 \cdot h_{eW}}{h_e \cdot l_b} = \frac{C_1}{l_b} + \frac{C_2}{h_e \cdot l_b} = Cr_1 + \frac{Cr_2}{h_e} \quad \text{Ekvation 9}$$

Skärmotståndet har enheten N/mm^2 eller Nmm/mm^3 där den senare beskriver energin för att avverka $1 mm^3$ arbetsmaterial för en given ekvivalent spåntjocklek h_e . En ökad ekvivalent spåntjocklek leder till en minskad energikonsumtion per genererad spånvolym. Parametrarna Cr_1 och Cr_2 karakteriserar skärprocessen där Cr_1 beskriver belastning och energiomsättningen på spånsidan medan Cr_2 energiomsättningen på släppsidan [2]. Båda parametrarna är beroende av arbetsmaterialets egenskaper, Cr_2 är principiellt också starkt beroende av verktygets mikrogeometri avseende eggradie, fäsförslitning och släppningsvinkel samt Cr_1 är också beroende av verktygets utformning på spånsidan.

2.2.1.1 Metodik för framtagning av konstanter till skärkraftsmodeller

För att beräkna konstanterna Cr_1 , Cr_2 och motsvarande $k_{c1.1}$, m_c så svarvas matningstrappor där all skärdata förutom matningen hålls konstant. Matningen hålls konstant i 5 sekunder, det vill säga att trappstegens längd är 5 sekunder. Mätningarna utfördes med en frekvens på 100 Hz. Ett exempel på en matningstrappa visas i Figur 4.



Figur 4. Matningstrappa med verktyg 5 i SS2244

Medelkraften för de olika matningarna samt spånarean beräknas. Sedan definieras våra modeller för skärmotstånd, Ekvation 10 och specifik skärkraft, Ekvation 11. Sedan med hjälp av Levenberg-Marquardts algoritim [9] [10] som finns inbyggd i programvaran MathCad minimeras modellfelet för konstanterna Cr_1 , Cr_2 , $k_{c1.1}$ och m_c .

$$\text{Min}(Cr_1, Cr_2) = \sum_j \left[\frac{F_{c_j} - \left(Cr_1 + \frac{Cr_2}{h_{eW_j}} \right) \cdot A_j}{F_{c_j}} \right]^2 \quad \text{Ekvation 10}$$

$$\text{Min}(k_{c1.1}, m_c) = \sum_j \left[\frac{F_{c_j} - \left(k_{c1.1} \cdot h_{eW_j}^{-m_c} \right) \cdot A_j}{F_{c_j}} \right]^2 \quad \text{Ekvation 11}$$

2.2.2 DYNAMISKA SKÄRKRAFTER

Tidigare har statiska skärkrafter beskrivits. Dock förhåller det sig som så att skärkrafterna uppträder med en viss amplitud och frekvens. Att energiomsättningen i skärprocessen varierar beror bland annat på arbetsmaterialets varierande egenskaper, skärgeometri och vald skärdata [2].

Uppträdandet av oväntade vibrationer i skärande bearbetning beskrevs för första gången i början av 1900-talet av Taylor. Det dröjde dock ända till 1946 innan R. N. Arnold gjorde den första studien som behandlade s.k. självgenererade vibrationer.

Dessa vibrationer gör att precisionen och produktkvalitet reduceras, särskilt yttopografien. Om amplituden är tillräckligt hög i förhållande till vald skärdata kan vibrationerna till och med leda till att skärverktyget skadas [11].

2.2.2.1 Mätning av dynamiska skärkrafter

Det är inte helt okomplicerat att mäta de dynamiska skärkrafterna på ett korrekt sätt. Det krävs att skärkraftsgivaren har en hög egenfrekvens, samt att givaren är belägen så nära skärprocessen som möjligt. Hög egenfrekvens leder dock till låga signalnivåer som leder till ett högt signalbrus-förhållande samtidigt som känsligheten mot yttre magnetiska och elektriska störningar ökar. Att placera givaren så nära skärprocessen som möjligt ger även extra problem, eftersom givaren då utsätts för termisk relaterad signaldrift, vilket ofta leder till offsetfel, som lätt förväxlas med skärverktygets förslitningsuppträdande [2].

1992 utvecklades en kraftgivare för mätning av dynamiska skärkrafter vid Lunds Universitet. Kraftgivaren optimerades med avseende på maximal styvhet och känslighet och byggde på trådtöjningsgivare. Bandbredden i tangentialriktningen låg på 7.5 kHz , 5.5 kHz i axialriktningen samt 12.5 kHz i den radiella riktningen. Denna mätare håller än i dag måttet och användes därför vid försöken för de dynamiska skärkraftsmätningarna [2].

2.2.2.2 Variationstal ψ

För att beskriva hur storleken på skärkrafterna i de olika riktningarna varierar introduceras ett s.k. variationstal. Variationstalet för huvudskärkraften Ekvation 12 beskriver den relativa skillnaden mellan det aktuella värdet för den dynamiska tidsberoende skärkraften $F_{c,dyn}$ och den statiska huvudskärkraften F_c . Det maximala värdet för $F_{c,dyn}$ erhålls med Ekvation 13. På samma sätt räknas variationstalet och det maximala värdet på den tidsberoende skärkraften fram för matningskraften (F_f) och axials-kärkraften (F_p) [2].

$$\psi_c(t) = \frac{F_{c,dyn}(t) - F_c}{F_c} \quad \text{Ekvation 12}$$

$$F_{c,dyn,max} = F_c \cdot (1 + \psi_{c,max}) \quad \text{Ekvation 13}$$

Dynamiken skapas framför allt av spånbildningsprocessen och på verktygets spånsida. Detta inses genom att variationstalet $\psi_c \rightarrow 0$ när $h_1 \rightarrow 0$, det betyder att skärkrafterna blir nästan helt statiska för små teoretiska spåntjocklekar.

Frekvensinnehållet i skärkrafterna har också visat sig öka proportionellt med skärhastigheten (v_c). Dock förhåller det sig som så att variationstalet är oberoende av skärdjupet (a_p), i de intervall där den ekvivalenta spåntjockleken (h_e) kan betraktas som konstant. För att säkerställa att förändringar på släppningssidan inte får allt för stor betydelse, och därmed göra det möjligt att jämföra de dynamiska skärkrafterna mellan olika material kan istället Ekvation 14 användas för att beskriva variationstalet.

$$\psi_{cr}(t) = \frac{F_{c,dyn}(t) - F_c}{C_1 \cdot h_1} \quad \text{Ekvation 14}$$

Att variationstalet ψ_{cr} varierar beror som tidigare nämnts av varierande skärmotstånd i arbetsmaterialet, men också av en varierande teoretisk spåntjocklek (h_1) och variation i teoretisk spånbredd (b).

Variation i skärmotståndet (Cr) kan bero på segmentbildning i skärprocessen. Andra källor till variation i skärmotståndet kan vara lokala deformationszoner, som uppkommit på områden där skäret tidigare passerat, eng: multi-stage deformation. Ett inhomogent arbetsmaterial skulle också kunna vara en källa till variation i skärmotstånd. Även spåntjockleken och spånbredden varierar på liknande sätt [2]:

$$\psi_{h_1} = \frac{h_1(t) - h_1}{h_1} \quad \text{Ekvation 15}$$

$$\psi_b = \frac{b(t) - b}{b} \quad \text{Ekvation 16}$$

2.2.2.3 Spångenerering och segmentering

Vilken spåntyp som bildas är starkt relaterat till dynamiken i processen. Högre variationstal innebär högre segmenteringsfrekvens. Det är två grundläggande deformationsmekanismer som bidrar till formationen av ett segment. Den första är sprickformation, som uppstår om arbetsmaterialet är sprött till exempel gjutjärn och spänningarna som uppstår tillräckligt höga. Den andra mekanismen är att materialet deformationshårdar samtidigt som spänning och temperaturen ökar tills det att segment skjuvas bort från arbetsstycket.

Tiden det tar för ett segment att bildas:

$$t_s = \frac{e_1}{v_c} = \frac{e_2}{v_{ch}} \quad \text{Ekvation 17}$$

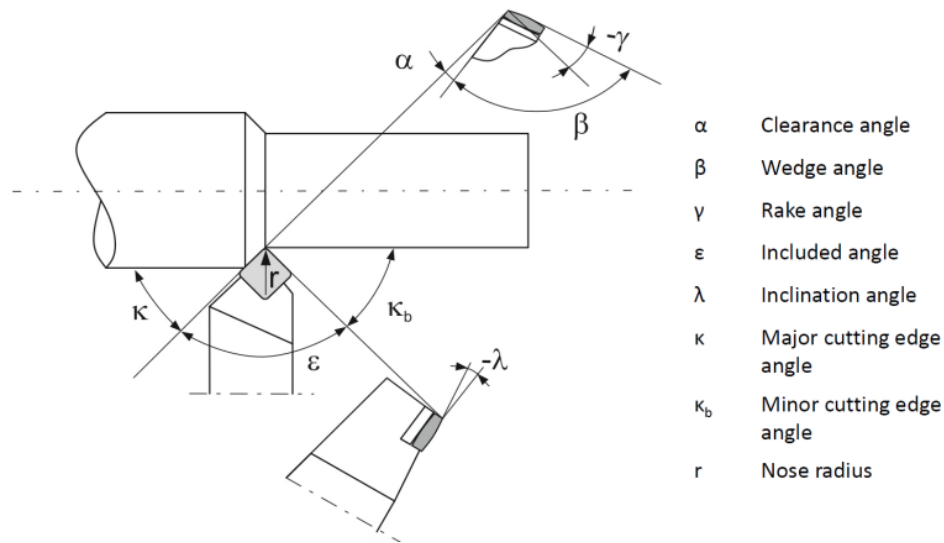
Segmenteringsfrekvensen f_s blir således:

$$f_s = \frac{1}{t_s} = \frac{v_c}{e_1} = \frac{v_c}{\lambda_h \cdot e_2} = \frac{v_{ch}}{e_2} \quad \text{Ekvation 18}$$

Där e_1 och e_2 är tjockleken på ett segment innan respektive efter deformation, v_{ch} är spånans hastighet. Segmenteringsfrekvensen talar om hur många segment som bildas per tidsenhet [2].

2.3 Verktygsgeometri

Vinklar oberoende av verktygshållaren är eggvinkeln β och spetsvinkeln ε . Vinklarna β och ε påverkar processen på framförallt två sätt, med ökade vinklar ökar verktygets styrka samt att det förbättrar värmetransport från skäret. Spånvinkeln γ och släppningsvinkeln α är beroende av verktygshållaren. Släppningsvinkeln ändras dessutom med matningsvinkeln. Nosradien rundar av eggvinkeln för att säkerställa styrkan i nosen är tillräcklig. Nosradien tillsammans med matningen bestämmer den teoretiska ytfinheten. Lutningsvinkeln λ påverkar både skärkraft och spånavlägsning. En negativ lutningsvinkel påverkar kraftbilden positivt men kan leda till att spånan leds in i arbetsstycket och påverkar bearbetade ytan negativt [2].



Figur 5 Vinklar för skärverktyg [2].

2.3.1 Eggradie, r_β

Eggradien beskrivs oftast idealt som en radie. Men det är inte ovanligt att eggradien ökar från släppsidan till skärsidan och bildar en evolvent liknande kurva [2]. Eggradien har en betydande effekt på verktygets livslängd, ett verktyg med undermålig egg kan brytas ner snabbt [12].

Medan jämnt bearbetade eggradier ökar skärets hållfasthet gör det skäret ineffektivt, speciellt för en hög effektiv materialverkan så skall faktorn $\lambda = \frac{h_e}{r_\beta}$ vara konstant längs ingreppet. En uniform eggradie resulterar i att λ blir väldigt låg vid spetsen på skäret där spåntjockleken blir väldigt liten. Detta bidrar till plogning som medför höga spänningar och verktygsslitage. Ineffektiv bearbetning resulterar i ökade spänningar i arbetsstycket vilket i sin tur ökar mekanisk och termisk belastning som resulterar i höga temperaturer. Özel et. al [13] föreslår en ojämnt bearbetad eggradie där $r_{\beta c} < r_{\beta b} < r_{\beta a}$. I analysen görs klart att med ovan nämnda konfiguration så minskar:

- Värmeutvecklingen längs egglinjen.
- Mindre plastisk deformation på arbetsstycket.
- Verktygsförslitningen minskar.

2.3.2 VERKTYGSMATERIAL

Stora krav ställs på verktyget vid skärande bearbetning. Verktyget ska vid höga temperaturer kunna motstå förslitning på både spån- och släppsidan, vara hårt och ha god eggskärpa. Utöver detta ska verktyget även vara segt och tåla mekaniska påfrestningar, samt motstå plastisk deformation, diffusion och kemisk påverkan. [14].

Utvecklingen av verktygsmaterial har under seklet gått i en rasande fart. I början av seklet dominerades marknaden av kolstål. Kolstålet ersattes därefter av snabbstål, som i sin tur blivit ersatt av hårdmetall, keramiska skär, och diamant och bornitrid. Dock är det hårdmetallen som idag dominerar marknaden. [14] Man bedömer idag att försäljningen av belagd hårdmetall står för mellan 80-90% av marknaden [15]. Utöver hårdmetall, så finns även keramiska material på marknaden. Utvecklingen av skärverktyg idag består framför allt av att förbättra beläggningstekniken och av att ta fram optimala makro – och mikrogeometrier för verktygen [14].

Själva namnet hårdmetall kan dock ge en något missvisande bild av materialet. De vanligaste hårdmetallerna i dag är ur materialteknisk bemärkelse inte särskilt lik en metall alls, utan liknar mer en keram. Eftersom dagens hårdmetaller vanligtvis består till allra största del; ca 90 % av den keramliknande WC-karbid och till 10 % av bindefasmetallen kobolt. Språkligt sett har engelsmännen träffat bättre i sin beskrivning, där hårdmetallen istället kallas cemented carbides [16].

Hårdmetallen byggs upp av karbidpartiklar och en bindemetall, där den vanligaste karbiden är WC och det vanligaste bindemetallen är kobolt, men även nickel förekommer. Ett färdigt skärverktyg består vanligtvis av 3-15 volymprocent bindemedel och 85-97 volymprocent karbid.

De vanligaste karbider som blandas in i hårdmetall är WC, TiC, NbC och TaC, där WC får en hexagonal atomstruktur och TiC, TaC och NbC får en kubisk atomstruktur. Gemensamt för samtliga dessa karbider är att de är mycket stabila och har hög hårdhet och smältpunkt.

Eftersom de ovan nämnda karbider är lösliga med varandra, så är det fullt möjligt att tillverka hårdmetall bestående av samtliga dessa karbider. Man talar då om (Ti, Ta, Nb, W)C.

Nedan visas en tabell med fysikaliska egenskaper hos några vanliga karbider [14].

Tabell 1 Materialdata för karbider i verktygsmaterial [14].

Karbider	Hårdhet [HV]	Smältpunkt [°C]	E-modul [kN/mm²]	Värmeledningsförmåga [J/mK]
WC	2350	2780	720	121
TiC	2800	3070	470	21
TaC	1550	3990	560	22
NbC	1800	3610	580	14
TiN	2100	2950	590	29

Anledningen till att hårdmetallen blivit så framgångsrik beror på att man med hårda karbider och mjukare bindemedel får en produkt med bra kombination av hårdhet och seghet. Hårdheten hos en hårdmetall kan ligga mellan 700-2200 [HV] och segheten mellan 5-30 [$MNm^{-3/2}$] [16]. Ytterligare en framgångsfaktor för hårdmetallen ligger i att den kan gjutas i komplicerade geometrier med gott resultat [15].

Fördelarna med hårdmetall är dess unika kombination av seghet och hårdhet. Materialet har också hög värmetålighet och är mycket slitagetåligt. Dessutom går det utmärkt att belägga hårdmetallen med ytskikt. Till nackdelarna hör att tillverkningen kräver pressning och sintring, vilket i sin tur kräver att användaren förstår materialet. Egenskaperna hos hårdmetallen går heller inte att ändra på efter tillverkningen, d v s det fungerar inte som ett vanligt stål som kan härddas om. Det höga priset är också till materialets nackdel. Detta eftersom de största volfram fyndigheterna finns i Kina. Utöver detta är korrosionsmotståndet vid både höga och låga pH-värden dåligt. Detta eftersom sura lösningar löser upp kobolten och basiska lösningar löser upp volframkarbiden [16].

2.3.2.1 Tillverkning av Hårdmetall

De beståndsdelar som hårdmetallen ska bestå av vägs och blandas noga. Detta pulver pressas sedan till den form man vill att verktyget ska ha, men i dubbelt så stor skala. Efterföljande sintringsoperation får den pressade grönkroppen att krympa med ungefär 50 %.

Vid sintringsförloppets början består det pressade hårdämnet av karbidkorn, kobolt, pressmedel (ca 15 vol. %), samt håligheter (ca 30 vol. %). Man brukar dela in sintringsprocessen i fyra olika delprocesser. Dessa är

1. Avdrivning av pressmedel
2. Reaktion mellan bindefas och karbid
3. Porförlutning
4. Kylning

När sintringen är klar har man då fått ett hårdmetallsverktyg där en del av binde-medlet kokats bort och en andel av kobolten smält runt volframkarbiden [16] [2].

Egenskaperna hos hårdmetallen bestäms sedan bland annat av halten bindefas och hårdämets typ och kornstorlek. Ett finkornigt verktyg får en ökad hårdhet och god beständighet mot abrasivt slitage, vilket i sin tur leder till förbättrad fasslitstyrka, och förbättrad beständighet mot strålförlutning. Utöver detta ger också finkornigheten en bättre eggskärpa, vilket gör att man med bra resultat kan genomföra finbearbetning. En kombination av finkornighet i kombination med hög halt av bindefas leder också till en förbättrad seghet, vilket gör att grovbearbetning kan genomföras med bra gott resultat.

Allt för höga halter av bindefas leder till låg hårdhet, vilket medför risk för plastisk deformation. Det är därför viktigt att de ovan nämnda delprocesserna i sintringsförloppet är noga avvägda, för att erhålla ett skärverktyg avsedd för ändamålet. Normalt så slipas, poleras och blästras skärverktyget innan det beläggs. Beläggningsen görs med antingen CVD (Chemical vapour deposition) eller PVD (Physical vapour deposition) [14].

Vanliga beläggningar på verktygen är Titankarbid (TiC), aluminiumoxid (Al_2O_3) och titannitrid (TiN). Beläggningstyperna brukar bestå av antingen enkel, dubbel – eller trippelskikt. Ett enkelskikt består vanligtvis av TiC, med en skiktjocklek på i storleksordningen 6 μm . Ett dubbelskikt består normalt av TiC och Al_2O_3 , där skiktjocklekarna är 6 respektive 1 μm . Det tredje alternativet består av TiC, Al_2O_3 och TiN, där skiktjocklekarna är 4 och 3 respektive 1 μm .

Tabell 2 beskriver belägningarnas för- och nackdelar, samt vid vilka förhållanden de lämpar sig [14].

Tabell 2 *Bellägnings för- och nackdelar [14].*

Typ	Fördelar	Nackdelar	Bäst vid
TiC	Hård. God vidhäftning	Stor strålförslitning och påsmetningar	Lägre temperaturer
Al ₂ O ₃	Effektiv diffusions-spärr. God kemisk stabilitet	Dålig vidhäftning direkt på substratet. Mjukare än TiC vid låga temperaturer.	Hög temperatur, d.v.s. på spånsidan vid hög bearbetningshastighet.
TiN	Mindre påsmetning än TiC. Något bättre mot strålförslitning.	TiN något lägre hårdhet.	Fluktuerande temperatur, frässorter.

Tabell 3 visar några vanliga belägningarna på skärverktyg från Seco Tools som bl.a. använts i föreliggande undersökning.

Tabell 3 *SECO Tools belägningar [17].*

Beläggning	Beskrivning
TP2500	Belagd med Ti(C,N) + Al ₂ O ₃ DURATOMIC
TK1001	Hård finkornig metallsort, med låg andel bindefas. CVD-belagd med Ti(C,N) + Al ₂ O ₃ Duratomic-skikt
TK2001	Finkornig hårdmetallsort med hög seghet. CVD-belagd med Ti(C,N) + Al ₂ O ₃ Duratomic-skikt
TH1000	PVD-belagd TiSiN-TiAlN nano laminat. Hög eggseghet, hög motståndskraft mot urflisning, bra spånkontroll och ett alternativ till keramik.
TM2000	Ti(C,N) + Al ₂ O ₃ DURATOMIC. Motståndskraftig mot fasförslitning och löseggsbildning.
TM4000	Ti(C,N) + Al ₂ O ₃ DURATOMIC. Bra eggseghet och slitstyrka. Används framför allt för rostfria stål.
CP500	Mycket slittålig PVD-beläggning med (Ti,Al)N + TiN.
TS2000	Belagd med (Ti,AL)N+TiN.

2.4 Verktygslivslängd

Ett verktygs livslängd är avgörande för beräkningar av tillverkningskostnader. Vid maximering av produktionshastighet eller minimering av produktionskostnad så är en modell för verktygets förslitning vital.

All form av verktygsförslitning är ett resultat av rådande skärdata, verktygsmaterial och arbetsmaterial. Förslitningen definieras som summan av den termiska, mekaniska och kemiska förslitningen som påverkar verktyget [2].

Det finns huvudsakliga grupper som karakteriserar ett utslitet skär:

- Frakturer och sprickor framkommer på grund av mekanisk eller termisk överbelastning.
- Mekanisk utnötning mestadels på grund av hårda partiklar i arbetsmaterialet: karbider och oxider.
- Plastisk deformation uppstår om skäret uppvisar tillräcklig seghet men inte tillräckligt motstånd mot deformation.
- Adhesion är skjuvningen av pressvetsade områden mellan arbetsmaterialet och skäret.
- Diffusion sker vid höga skärhastigheter och löslighet mellan materialen. Verktygsmaterialet är försvagat på grund av kemiska reaktioner, ämnes-transport på atomnivå mellan verktygsmaterialet och arbetsmaterialet.
- Oxidation sker även det vid höga skärhastigheter. Vid kontakt med syret i luften oxiderar verktygsmaterialet och strukturen försvagas.

De olika förslitningsprocesserna leder till att material kontinuerlig avlägsnas ifrån verktyget. Det finns tre huvudsakliga olika förslitningstyper; grop, fast och strålförslitning som alla skvallrar om förslitningens härkomst, Figur 6.

Verktygets livslängd och förslitningsvillkor skall inte förväxlas. Verktygets livslängd beskriver när ett verktyg inte fungerar som tänkt medan ett förslitningsvillkor beskriver när ett verktyg bör bytas ut för att inte riskera att det fallerar i funktion, alltså innebär ett förslitningsvillkor en viss marginal mot verktygets livslängd. Valet av förslitningskriterium beror på processen och de toleranser som skall uppfyllas [18].

2.4.1 COLDINGS EKVATION

Modeller för verktygsförslitning kräver att tester utförs tills det att utslitningskriteriet är uppfyllt. Det innebär att testerna blir krävande både ur arbetsmaterial- och tidsåtgång.

En förslitningsmodell beskriver förhållandet mellan ingreppstiden och flankförslitning VB , ett vanligt utslitningskriterium är $VB = 0.3 \text{ mm}$.

När flankförslitningen tilltar så konsumeras först beläggning sedan substratmaterial det innebär att substratmaterialens egenskaper kommer öka i betydelse under förslitningens gång. Modellen dikterar att flankförslitningen skall vara den dominerande förslitningen för modellens giltighet [19].

Coldings modell är en vidareutveckling av Taylors ekvation för beräkning av verktyglivslängden [20]:

$$V_c T^n = C \quad \text{Ekvation 19}$$

Där V är skärhastighet, T är tid och C är skärhastigheten som innebär en minuts livslängd. Konstanten n bestämmer lutningen i Taylor planet; ett diagram med log-log skala med skärhastigheten och verktyglivslängd på axlarna. Problemet med den grundläggande Taylor ekvationen är att den inte tar hänsyn till matning och skärdjup, vilka också bidrar till verktygsförslitning om än inte till samma grad som skärhastigheten. Därför publicerade Boston et al. [21] 1943 Taylors utvidgade ekvation:

$$V_c T^n f_a^b = K_t \quad \text{Ekvation 20}$$

Den utvidgade varianten behandlar skärdjup och matning som oberoende av varandra. När Colding 1961 presenterade en polynomanpassning innehållande nio konstanter som en förbättring till Taylors ekvation så slog han ihop effekten av skärdjup och matning genom ansättningen att verktygsförslitningen varierar med ekvivalent spåntjocklek. Coldings modell för verktygsförslitning beskriver relationen mellan verktygets livslängd, skärhastighet och ekvivalent spåntjocklek.

Då det krävdes en stor mängd data för den första modellen presenterade Colding [22] 1981 en ny modell med fem konstanter som var mer hanterbar:

$$k + y + bx + cx^2 + dz + hxz = 0 \quad \text{Ekvation 21}$$

$$\text{där } x = \ln h_e, y = \ln v_c, z = \ln T \quad \text{Ekvation 22}$$

Coldings ekvation kan skrivas om som paraboliska ekvationer:

$$v_c = e^{\left[K - \frac{(\ln(h_e) - H)^2}{4 \cdot M} - (N_0 - L \cdot \ln(h_e)) \cdot \ln(T) \right]} \quad \text{Ekvation 23}$$

Eller:

$$T = e^{\left[\frac{H^2 - 2 \cdot H \cdot \ln(h_e) + \ln(h_e)^2 - 4 \cdot K \cdot M + 4 \cdot M \cdot \ln(v_c)}{4 \cdot M \cdot (N_0 - L \cdot \ln(h_e))} \right]} \quad \text{Ekvation 24}$$

Konstanterna H , K , M , N_0 och L beskriver förhållandet mellan skärhastigheten och verktyglivslängden [23].

Ekvationerna beskriver skärhastighet respektive verktyglivslängd för givet arbetsmaterial och verktygsmaterial. Coldings modell har hög validitet enligt Hägglund [24] som i studier visade att under rätt förhållanden kan skärhastigheten bestämmas med mindre än 1 % fel.

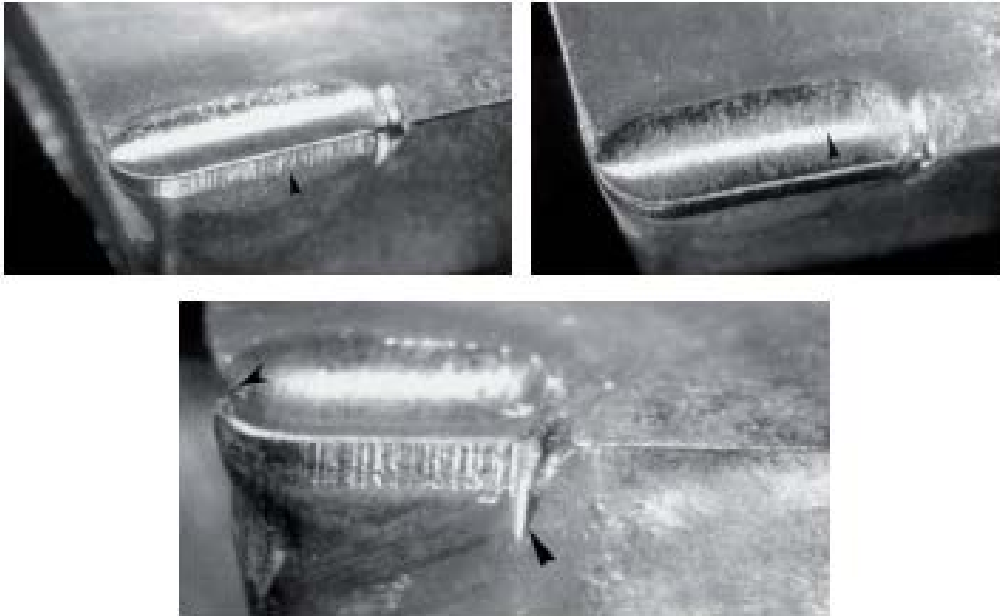
Man kan notera att när nämnaren i Ekvation 25 är lika med noll:

$$4 \cdot M \cdot (N_0 - L \cdot \ln(h_e)) = 0$$

$$M \neq 0 \rightarrow h_e = e^{\frac{N_0}{L}}$$

Ekvation 25

Så får vi en teoretisk verktyglivslängd som är oändlig, i alla fall om man bortser ifrån att antagandet om att flankförslitning är den dominerande förslitningstypen möjligen inte gäller vid sådana skärdata att ovanstående uppfylls.



Figur 6 De tre grundläggande typerna av förslitning, till vänster flankförslitning, till höger groppförslitning och den nedre bilden visar strålförslitning [2].

2.5 Arbetsmaterial

I avsnittet arbetsmaterial redogörs indelningen av arbetsmaterialen samt en beskrivning av de grupper som utgör indelningen. Generaliserad skärbarhet för de olika materialgrupperna samt faktorer som påverkar skärbarheten diskuteras. En modell där Cr_1 beräknas med hjälp av materialparametrar avslutar avsnittet.

2.5.1 INDELNING AV ARBETSMATERIAL

Grovt kan man dela in metalliska arbetsmaterial enligt följande

- gjutjärn
- stål
- rostfritt stål
- superlegeringar inklusive titan
- Icke järnlegeringar m.m.

Varje grupp innehåller dock material med olika egenskaper i skärbarhetssynpunkt. Därför måste man dela in dessa i ytterligare materialgrupper för att göra det begripligt ur skärbarhetssynpunkt. [25] Man har enligt ISO-standard delat in arbetsmaterialen i sex olika huvudgrupper, där varje grupp har unika bearbetningsegenskaper. Gruppen av arbetsmaterial har stor betydelse på vilket skärverktyg, sort, geometri och skärdata man väljer. Grupperna delas in enligt ISO-standard i; P, M, K, N, S och H [25].

2.5.2 MATERIALGRUPP P

Stål tillhör grupp P. Stål finns i allt från olegerat till höglegerat, men även som stålgiutgods. Det är den största materialgruppen inom skärande bearbetning. Normalt är skärbarheten bra, men kan dock skilja sig mycket beroende på materialhårdhet, andel kol etc. [25].

P-materialens undergrupper delas in baserat på arbetsmaterialens egenskaper, vilka baseras på arbetsmaterialets legering och struktur. Eftersom det framför allt är kolhalten som bestämmer egenskaperna hos arbetsmaterialen i gruppen, så utgör kolhalten en avgörande faktor för indelningen. P gruppen delas in i undergrupperna P1-P11.

Den första undergruppen innehåller de friskärande stålen. Den andra och tredje gruppen innehåller de lågkolhaltiga stålen vars viktprocent i kol understiger 0.25%. Skillnaden mellan dessa grupper är att P2 innehåller de olegerade stålen, medan P3 innehåller de legerade lågkolhaltiga stålsorterna. Vad gäller struktur så är de olegerade stålen i P2 ferritiska, medan stålen i P3 är både av ferritisk och ferrit/perlitisk karaktär. Grupp P4 och P5 innehåller de medelkolhaltiga stålen vars kolhalt i viktprocent överstiger 0.25 och understiger 0.67 %. På samma sätt som för P2 och P3 så är skillnaden att undergrupp P4 innehåller de olegerade medelkolhaltiga stålen medan undergrupp P5 innehåller de legerade. Både P4 och P5 är släckta och anlöpta. P6 och P7 innehåller de genomhårdade fjäderstålen. De är högkolhaltiga, d v s stålsorternas legering överstiger 0.67 viktprocent kol. Grupp P 8 innehåller verk-

tygsstål och snabbstål, de är hårda och abrasiva och relativt svårbearbetade. Den sista gruppen P 11 innehåller de ferritiska och martensitiska rostfria stålen [26].

SS 1312 har en låg kolhalt och tillhör således den första gruppen och består till största delen av ferrit, vilket gör materialet tämligen mjukt. SS 1672 och SS 2244 tillhör de medelkolhaltiga stålen, där mikrostrukturen är av ferrit-perlitisk typ [17].

Man kan ändra mikrostrukturen i arbetsmaterialet genom värmebehandling. Detta har gjorts i SS 2541 som består av martensit. Martensiten fås genom snabbkylning. Denna snabbkylning leder till att kolatomerna inte hinner flytta på sig och således fångas i en mycket hård, men spröd BCT struktur. Genom en efterföljande anlöpning har man sedan reducerat denna sprödhet på viss bekostnad av hårdheten så kallat anlöpt martensit [27].

2.5.2.1 Legeringsämnen

Att tillföra legeringsämnen i arbetsmaterialet påverkar materialegenskaperna på ett avgörande sätt ur skärbarhetssynpunkt. Genom att tillföra legeringsämnen, som till exempel kol, mangan, krom, nickel, vanadin och volfram kan man ytterligare öka hårdheten på utgångsämnet. Legeringsämnena vanadin, volfram och krom fungerar som karbidbildare och leder till att materialet får en ökad slitstyrka. Krom och nickel används också i måttliga mängder till att förbättra utgångsämnets genomhärtningsförmåga. Dock kan tillsatser av nickel och kobolt i olegerat lågkolhaltigt stål i vissa fall öka risken för avsättningar på skärverktyget [2].

De legeringsämnen som däremot påverkar skärbarheten i positiv riktning är legeringar som bly (Pb), svavel (S) och kalcium (Ca). Men även mangan (Mn) i kombination med svavel (S) som leder till Mangansulfid. Dessa legeringar bedöms ha en smörjande effekt. Legeringar som fosfor (P) och svavel (S) bidrar till att underlätta spånbrytningen något [2].

2.5.2.2 Mikrostrukturer

Det är mängden kol och andra legeringsämnen som påverkar materialstrukturen. Beroende på sammansättningen av dessa legeringsämnen erhåller man olika materialstrukturer. De påverkar även skärbarheten såtillvida att olika strukturer har olika egenskaper.

Metaller har vid rumstemperatur och olegerat tillstånd tre grundläggande strukturer som har inverkan på skärbarheten. Dessa är ferrit, perlit och cementit. Ferriten är den mjukare och duktila strukturen, medan cementiten (Fe_3C) är den hårdaste och mest abrasiva strukturen. Det ska dock tilläggas att helt ferritiska metaller förekommer väldigt sällan [2].

Perliten i sin tur är en blandning mellan ferrit och cementit, där strukturerna ligger som lameller i varandra. Här har lamellernas storlek en stor inverkan på hårdheten i materialet, där perlit med fina lameller är hårdare än perlit med grova lameller [2].

Dock kan man med olika typer av tillverkning och legering erhålla ytterligare strukturer. De andra strukturerna är martensit, bainit och austenit. Vilken materialstruktur materialet erhåller beror framför allt på hur snabbt man kyler ner austeni-

ten under tillverkning. Med en långsam kylning erhålls perlit och en proektuid fas, medelsnabb kylning ger bainit och snabb kylning ger martensit [28].

Tabell 4 nedan visar kolhalten och hårdheten för de olika strukturerna och Tabell 5 visar en beskrivning av utseendet för de olika faserna.

Tabell 4 kolhalten i olika faser [29].

Mikrostruktur	Kolhalt [%]	Hårdhet
Ferrit	<0.06	Ca 90 HB
Perlit	0.85	275 HB
Cementit	6.67	67 HRC
Martensit	Varierande	<=67 HRC
Bainit	Varierande	40-50 HRC
Austenit	Varierande	Varierande

Tabell 5 Beskrivning av i stål mest förekommande faser och strukturer [28].

Struktur	Faser	Utseende
Grov Perlit	α ferrit + Fe_3C	Relativt tjock lamellstruktur mellan ferrit och Fe_3C .
Fin perlit	α ferrit + Fe_3C	Relativt tunn lamellstruktur mellan ferrit och Fe_3C .
Bainit	α ferrit + Fe_3C	Väldigt fina och avlånga partiklar av omgiva av ferrit.
Tempererad Martensit	α ferrit + Fe_3C	Väldigt små sfärliknande Fe_3C partiklar omgivna av ferrit.
Martensit	BCT	Nål-formad struktur.

2.5.3 MATERIALGRUPP M

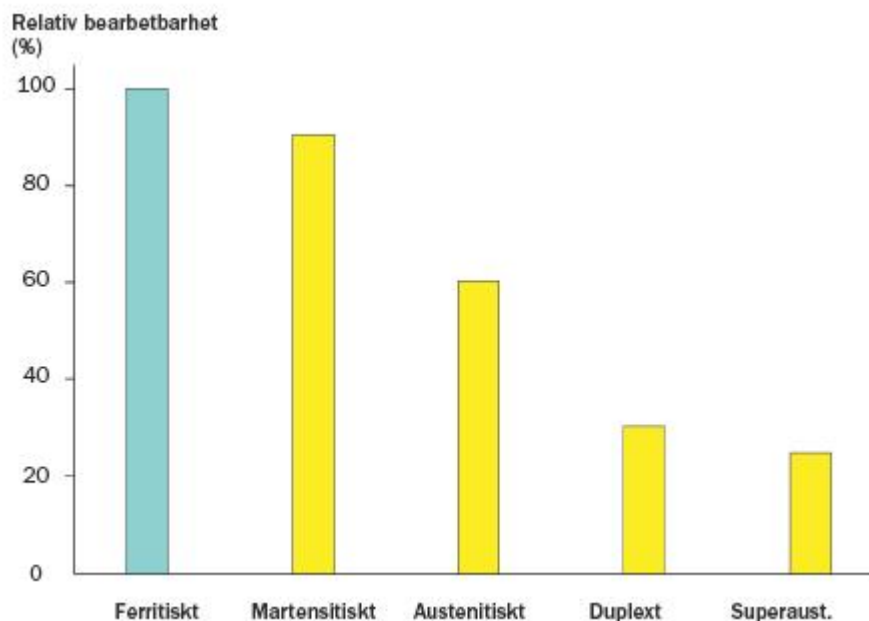
Grupp M innehåller rostfria stål. Rostfritt stål är legeringar som består av minst 12 % krom.

2.5.3.1 Skärbarhet i rostfritt stål

På grund av den stora spridningen av rostfritt stål så är det svårt att beskriva skärbarheten för hela gruppen. Men generellt så kan bearbetning av rostfritt stål beskrivas som kletig med trådiga spånor. Kletigheten bidrar till löseggsbildning som kan resultera i reducerad verktygslivslängd. Problem i bearbetning av rostfritt stål beror till stor del på fem materialegenskaper:

1. Hög draghållfasthet.
2. Stor spridning mellan sträckgräns och dragbrottgräns.
3. Hög duktilitet och seghet.
4. Hög arbetshärdning.
5. Låg termiskkonduktivitet.

Rostfria stål kan delas upp i fem grupper. Fyra av grupperna baseras på mikrostrukturen och en på utskiljningshärdning, som baseras på typen av värmebehandling snarare än mikrostruktur [27].



Figur 7 Skärbarheten i olika beståndsdelar [25].

2.5.3.2 Ferritiskt rostfritt stål

Ferritiskt rostfritt stål har en BCC struktur, molybden adderas till en del legeringar för att förbättra korrosionsmotståndet [27].

2.5.3.3 *Martensitiskt rostfritt stål*

Martensitiskt rostfritt stål har en BCC eller BCT struktur. För att öka hållfastheten så ökas kolhalten i en del legeringar, för att bibehålla korrosionsmotståndet ökas då även kromhalten. Molybden och nickel kan adderas för bättre mekaniska egenskaper och korrosionsmotstånd. Nickel ser också till att önskad mikrostruktur erhålls genom att begränsa mängden fri ferrit när högre kromnivåer används [27].

2.5.3.4 *Austenitiskt rostfritt*

FCC struktur. Två grupper; en bestående av nickel för att bibehålla austenitisk struktur vid rumstemperatur och den andra med en betydande mängd mangan vanligtvis med högre nivå kväve och i många fall nickel. Har ofta bra duktilitet även vid kryogen temperatur [27].

2.5.3.5 *Duplex rostfritt*

Duplext rostfria stål är som namnet antyder ett material med två faser, austenit och ferrit. Grovt indelas de duplexa rostfria stålerna i tre typer; "lean duplex", som kännetecknas av sin relativt låga andel legeringsämnen, den största gruppen konventionell duplex och den höglegerade gruppen super duplex, vars användningsområde är speciellt krävande applikationer.

Samtliga duplex rostfria stål har mer än dubbelt så hög sträckgräns jämfört med andra rostfria stål, utan att för den delen erhålla en högre brottförlängning. Samtliga stålsorter i de duplexa grupperna har hög mekanisk slitstyrka.

Dessa stålsorter används där stora krav ställs på korrosionsmotstånd. Typiska områden för detta är inom pappersindustrin, trycktankar och avsaltningssystem. Duplexa rostfria stål har i regel en lägre skärbarhet, av samma anledning som andra rostfria stål [30].

2.5.3.6 *Skärbarhetstillsatser*

De viktigaste tillsatserna ur skärbarhets synpunkt är de som bildar inneslutningar i metallen. Exempel på sådana tillsatser är svavel och selen. Selen ökar den generella skärbarheten av ett material. Svavel agerar i princip som mangansulfider som innehåller krom och järn. När mangan till svavel kvoten ökar, ökar skärbarheten ytterligare. Selen beter sig likartat som svavel [31].

2.5.4 MATERIALGRUPP K

Grupp K är gjutjärnsgruppen och består av Gråjärn (GCI), aducerbart gjutjärn (MIC), nodulärt gjutjärn (NIC), kompakt gjutjärn (CGI) och bainithärdat gjutjärn (AID). Av dessa material är gråjärn och aducerbart gjutjärn lättbearbetade, medan de övriga är besvärligare. Av dessa sorter innehåller samtliga kiselkarbid (SiC), vilket är mycket nötande på skäreppen. Materialen i denna grupp är kortspånande [25].

Gjutjärn har större andel kol och kisel än stålen i materialgrupp P. På grund av den högre kolhalten så innehåller gjutjärn en kolrik fas. Beroende på komposition, nedkylningshastighet och smältbehandling kan gjutjärn övergå till fast form antingen som det metastabila Fe- Fe₃C systemet eller det stabila Fe-Gr systemet.

Formationen av stabil eller metastabil eutektisk är en funktion av många faktorer som inkluderar kärnbildningspotentialen av smältan, kemisk komposition och kylningshastighet. De första två bestämmer potentialen för grafitbildning i gjutjärnet, om potentialen är hög bildas grafit och är den låg resulterar det i järn med järnkarbider.

Gråjärn har en grå brottyta eftersom att brott sker längs grafitplattor, grafiten som bildas är lamelläer och matrisstrukturen perlit.

I Segjärn är grafiten av sfärisk form. Den mest använda tillsatsen för att främja sfärisk grafit är magnesium. Mängden magnesium som krävs för att det ska bli sfärisk grafit är 0.03 % - 0.05 %, exakt nivå beror på nedkylningshastigheten en högre hastighet kräver mindre magnesium [32].

2.5.4.1 Skärbarhet gjutjärn

Närvaron av grafit i gjutjärn bidrar till att gjutjärn är relativt lätt att bearbeta, mängden och formen på grafit bestämmer den potentiella ytfinheten. Mikrostrukturen runt grafiten bestämmer till stor del skärbarheten av materialet. Hårdheten på gjutjärn är således en indikator för skärbarheten eftersom hårdheten bestäms till stor del av matrisen runt grafiten.

Ferrit: I praktiken en kolfri beståndsdel. Frånsett grafit så är ferrit den mjukaste beståndsdel i gjutjärn. Dock är den inte lika mjuk som i stål eftersom ferriten i gjutjärn innehåller kisel.

Perlit: Vanlig beståndsdel i järn med medium hållfasthet och hårdhet. Består av plattor i lager bestående av mjuk ferrit och hårda järnkarbider. Tjockleken på plattorna bestämmer hårdheten på perlit, finare struktur är hårdare och mer hållfast än grövre.

Karbider: Extremt hårda beståndsdelar vare sig de är rena järnkarbider eller består av legeringsmaterial, bestämmer i stor utsträckning verktygslivslängd.

Skärbarheten i gråjärn är mycket god. Grafitflagorna introducerar diskontinuiteter i metall matrisen som bidrar till spånbrytningen, grafiten smörjer även skärverktyget.

I segjärn bildas grafiten i sfärisk form och beter sig likadant som i grått gjutjärn d.v.s. som spånbrytare och smörjning. Även om segjärn har en väsentligt högre draghållfasthet jämfört med gråjärn så är skärbarheten i vissa applikationer bättre i segjärn [31].

2.5.5 MATERIALGRUPP N

Grupp N är de mjuka icke-järnmetallerna; aluminium, koppar, mässing osv. Denna grupp är tämligen lättbearbetad. Man kan hålla höga skärhastigheter och samtidigt bibehålla en lång verktyglivslängd.

Inom materialgruppen görs försök med två typer av mässing, 'ecobrass' som är blyfri och en mässing med blytillsatser. Bly adderas till mässing för att öka skärbarheten, bly förbättrar både spånbrytningen och agerar som smörjning i skärprocessen. Mässing delas generellt upp i två grupper alfa legering med mindre än 37 % zink och alfa-beta legering med 37- 45 % zink. Alfa legeringar är duktila och kan kallbearbetas med gott resultat. [31] Alfa-beta legeringar eller duplex legeringar har en begränsad duktilitet vid rumstemperatur men är hårdare och har en högre hållfasthet. De mässingsorter som försök utförs med är, en med bly *CW614N* som är en alfa-beta legering, och en Ecobrass med materialbeteckningen *CW724R* som är en alfalegering där varken bly, nickel eller andra substanser som kan vara farliga för miljön eller hälsan är närvarande vilket gör materialet lämpligt för rörledningar etc. [33].

2.5.6 MATERIALGRUPP S

Grupp S består av ett antal varmhållfasta superlegeringar och omfattar ett stort antal höglegerade järn-, nickel-, kobolt- och titanlegerade material. Materialen i denna grupp är svårbearbetade, eftersom de är kletande och genererar värme [25].

2.5.6.1 Inconel 718

Mikrostrukturen i Inconel 718 är γ'' i vilken nickel och niobium kombineras i sällskap av järn för att forma BCT Ni_3Nb vilken sammanhänger med γ – matrisen. Gammamatrisen i Inconel 718 har en hållfasthet som håller under hög temperatur under lång tid. En del legeringar kan användas till 85 % av smälttemperaturen under 100000 h. Järnet agerar primärt som en katalysator för formationen av γ'' vilken är en metastabil fas. Denna fas bidrar till väldigt bra hållfasthet i låg- till medeltemperaturer, men är instabil i temperaturer över 650 °C.

Maximal användningstemperatur för Inconel 718 är således 650 °C på grund av instabiliteten av γ'' . Legeringen klarar av sådana tillstånd på grund av tre faktorer [32]:

1. Hög tolerans för nickel i smältan utan fas instabilitet på grund av nästan fyllt d-skal.
2. Tendens att med krom adderat forma Cr_2O_3 som har få katjonvakanser. Därmed begränsas diffusionshastighet av metalliska element utåt och av syre, kväve och svavel inåt.
3. Tendensen att vid hög temperatur bilda Al_2O_3 skikt som bromsar fortsatt oxidering.

Problem med bearbetning i Inconel 718 uppstår främst på grund av:

- Högt skjuvmotstånd som bidrar till höga skärkrafter.
- Hög benägenhet att deformationshårdna.
- Närvaron av abrasiva intermetalliska partiklar i mikrostrukturen.
- Låg termisk konduktivitet innebär en varmare skjuvzon som bidrar till högre verktygsslitage.

2.5.6.2 Titan 6-4

Titan har en väldigt hög specifik hållfasthet och korrosionsmotstånd. Densiteten är ca 55 % av vanligt stål. Titans korrosionsmotstånd är baserat på formationen av ett stabilt skyddande oxidlager. Vid rumstemperatur har kommersiellt ren titan en HCP α -fas. Vid 883 °C så ombildas α -fasen till β -fas i BCC struktur.

Titan 6-4 är en α - β legering, den har en komposition som tillåter både α och β fas vid rumstemperatur.

Titan används till exempel i pappersmassa- och kemiindustrin på grund av dess goda korrosionsmotstånd och i biomedicinska applikationer på grund av titans inertitet till den mänskliga kroppen.

Ti6Al4V är den mest använda titanlegeringen som har ett krypmotstånd upp till 300 °C och en utmärkt utmattningshållfasthet. I titan är den huvudsakliga effekten av legeringsämnen att påverka α - β fas förhållandet. Aluminium stabiliserar α - fasen och Vanadium β - fasen. Det är förekomsten av båda faser som ger Ti6Al4V sina goda egenskaper.

Titan har en tendens att svetsas fast på skärverktyget och när dessa lämningar skjivas av så kan det leda till verktygsslitage genom avflisning och tillslut verktygshaveri. Titan har också låg värmekonduktivitet vilket bidrar till högre temperatur i skjuvzonen vilket accelererar både kemisk reaktivitet och nedbrytningen av verktyget. Titans låga elasticitetsmodul kan också bidra till problem då arbetsstycket måste vara väl uppspänt vid bearbetning [32].

2.6 Skärbarhet

Skärbarhet är en term som beskriver den svårighetsgrad med vilken ett material låter sig bearbetas [2]. Skärbarhet är ett komplext begrepp, så att jämföra arbetsmaterialens samtliga egenskaper som kan påverka skärbarheten såsom dess metallurgiska, kemiska och mekaniska egenskaper, värmebehandling, tillsatser och inneslutningar räcker inte för att beskriva skärbarheten. Detta beror på att skärbarheten utöver rena materialegenskaper också påverkas av verktygsegenskaper, skärdata, samt övrig processdata [34]. Man kan därför inte avgöra skärbarheten på ett material utan att betrakta den enskilda applikationens speciella förutsättningar och det är svårt att erhålla jämförbara mätvärden [2]. Det existerar idag även en striktare syn på skärbarhet, där även de ekonomiska parametrarna ingår. Där jämför man den sammantagna bearbetningskostnaden för att framställa en viss detalj i det aktuella arbetsmaterialet. Begränsningen med den typen av definition ligger i att skärbarheten blir beroende av till exempel seriestorlekar och toleranser för ytfinheten. Förutom kostnader för skärverktyg, maskiner och personal så bör faktorer som kvalitén på den färdiga produkten, störningar och stillestånd orsakat av arbetsmaterialens uppträdande, produktionstakt samt miljö- och kretsloppsaspekter kopplat till arbetsmaterialet betraktas vid bedömningen av skärbarhet. Använder man sig av den senare definitionen på skärbarhet kan det dock hända att också kostnaden för arbetsmaterialet får ett visst inflytande på skärbarheten.

De fysiska uppträdandena på skärprocessen brukar delas upp i följande fem delområden [2].

- Effekter och skärkrafter
- Spåntyp
- Verktygsnedbrytning
- Ytfinhet
- Miljöfaktorer

2.6.1 MATERIALFAKTORER

De renodlade materialegenskaperna hos arbetsmaterialet som framförallt påverkar skärbarheten kan delas in i fem materialfaktorer. Dessa är

1. Duktilitet
2. Värmeledningsförmåga
3. Deformationshårdnande
4. Abrasivitet
5. Hårdhet

Duktilitet är ett mått på hur segt och formbart ett arbetsmaterialet är. Erfarenhetsmässigt har det visat sig att en hög duktilitet leder till vidhäftning mellan verktyget och arbetsmaterialet. Vidhäftning på verktyget kan vara både bra och dålig ur skärbarhetssynpunkt. Om avsättningen på skärebben tillräckligt stabil, så kommer vidhäftningen att tjänstgöra som en skyddande beläggning på skärebben, vilket då leder till att verktyget får en längre livslängd. Om avsättningen däremot omsätts i en högre takt kan både verktyg och arbetsytan komma till skada. Gränsen mellan dessa två fall är hårfin. Arbetsmaterial med hög duktilitet har ofta problem med spånbrytningen. Ett arbetsmaterials duktilitet bestäms av materialets brotttöjning ε_b [2].

Värmeledningsförmågan (termisk konduktivitet) beskriver hur bra den genererade värmen i skärprocessen leds bort av arbetsmaterialet. I regel är hög värmeledningsförmåga bra ur bearbetningssynpunkt [34].

Vad gäller processtemperaturen så är även materialegenskapen specifik värme en viktig egenskap. En ökning av materialegenskapen specifik värme med 1 %, leder till en minskad processtemperatur med flera grader [2].

Materialfaktorn deformationshårdnande beskriver ökningen av materialets hållfasthet vid plastisk deformation. Ökningen av hållfastheten framför allt beror på deformationshastigheten samt materialets förmåga att deformationshårdna. Ett snabbt deformationshårdnande hos arbetsmaterialet påverkar spånbildningen negativt, vilket leder till att en stor mängd energi måste tillföras för spånbildningen, vilket i sin tur leder till försämrad skärbarhet. Ett material som deformationshårdnar snabbt är framför allt austenitiskt rostfritt stål och flera av de värmebeständiga legeringarna, till exempel Inconel. Kolstål är däremot exempel på material som deformationshårdnar mycket långsamt. Det är av allra största vikt att djupet på den deformationshårdnande ytan inte överstiger värdet på matningen. Om så inte blir fallet utsätts skärebben för mycket svåra påkänningar [34]. Deformationsgraden S_n definieras enligt Ekvation 26.

$$S_n = \frac{R_m}{R_{p0.2}} = \frac{\sigma_B}{\sigma_S} \quad \text{Ekvation 26}$$

Där:

R_m = Materialets brottgräns

$R_{p0.2}$ = Materialets sträckgräns

Abrasivitet beskriver materialets benägenhet att nöta på verktyget. Den abrasiva förslitningsbenägenheten graderas i en skala från 1-10 [2]. Abrasiviteten kan bero på att arbetsmaterialet innehåller hårda makroinneslutningar. Makroinneslutningar är inneslutningar större än 0.15 mm och är förknippade med lågkvalitetsstål. Dessa inneslutningar uppstår vid tillverkning och kan till exempel bero på otillräcklig slaggborttagning. Dock existerar alltid mikroinneslutningar i stål. Deras inverkan på skärbarheten kan delas in i dels oönskade inneslutningar, mindre oönskade inneslutningar samt önskade inneslutningar.

Oönskade inneslutningar är de hårda och abrasiva inneslutningarna såsom aluminium och spinell (Al_2O_3 och Ca), vilka har en negativ inverkan på skärbarheten. De mindre oönskade inneslutningarna är de inneslutningar av järn – och manganoxider (FeO och MnO). Anledningen till att de beskrivs som mindre oönskade är att de inte är lika hårda och abrasiva som föregående grupp samt att de har förmåga att lättare följa med spånan. De önskade inneslutningarna består av kisel (Si) som bildar ett fördelaktigt skikt i skärområdet. Detta skikt bromsar i sin tur verktygsförslitningen.

Det är också möjligt att blanda i friskärande tillsatser i arbetsmaterialet, till exempel svavel eller bly för att öka skärbarheten [34].

Vid uppskattning av abrasivitet användes mätutrustning som mäter nanohårdhet med en Berkovichspets. En Berkovichspets har en relativt platt profil, med lutningssvinklar på 65.27° . Spetsen har sin form på grund av att det är relativt enkelt att tillverka en pyramid med tre sidor som möts i en punkt jämfört med Vickers som har fyra sidor. Vid hårdhetstester mäts avtrycket av spetsen och storleken på kontaktarean vid full last uppskattas från djup och given geometri på spetsen. Hårdheten uttrycks som medelkontakttryck vid nanohårdhetstester Ekvation 29 där h_c är kontaktdjupet av intrycket [35].

$$A = 3\sqrt{3}h_c^2 \tan^2 \theta \quad \text{Ekvation 27}$$

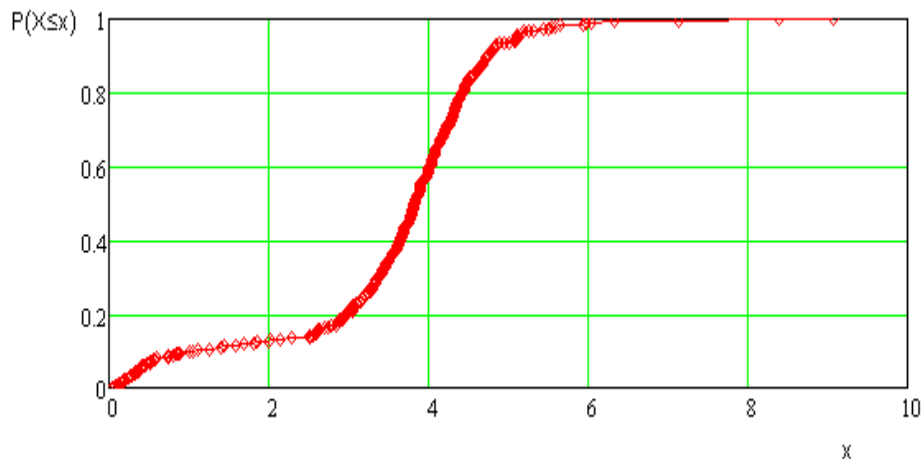
Som för $\theta = 65.27^\circ$, ger:

$$A = 24.494h_c^2 \approx 24.5h_c^2 \quad \text{Ekvation 28}$$

Då ges medelkontakttrycket (hårdheten) som:

$$H = \frac{P}{24.5h_c^2} \quad \text{Ekvation 29}$$

Resultatet av en hårdhetsmätning på SS 0727 (gjutjärn) blir enligt Figur 8, övriga fördelningsfunktioner presenteras i Appendix C. Där de 400 punkterna sorteras i storleksordning (min \rightarrow max) efter x-axeln efter respektive hårdhet, och y-axeln beskriver sannolikheten. Genom att ta medelvärdet på ett på förhand valt konfidensintervall på mätpunkterna och addera dess spridning, så erhålls ett värde på abrasiviteten.

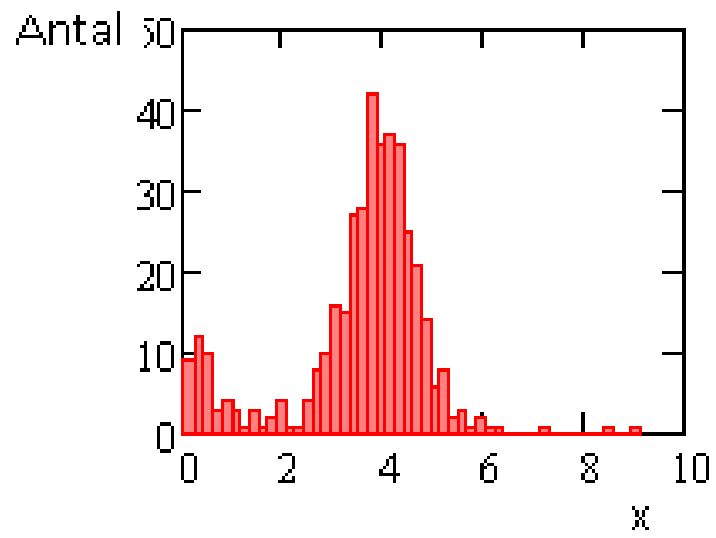


Figur 8 Sannolikhetsfunktionen för nanohårdheten i segjärn SS 0727.

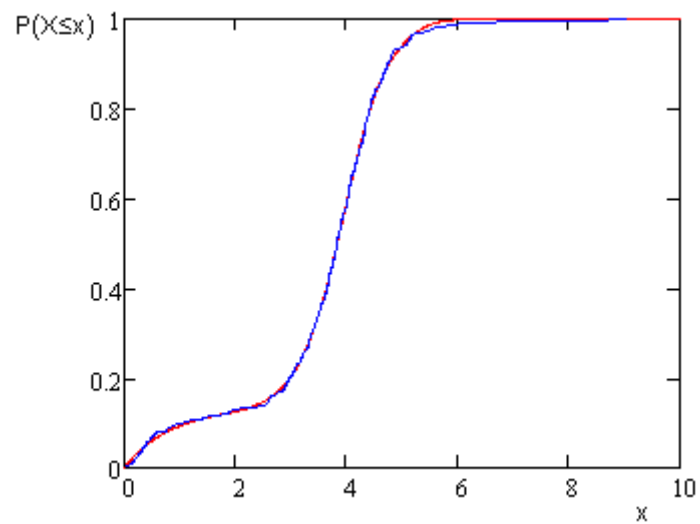
Att få en ytterligare uppfattning om hur hårdheten i materialet är fördelad, så kan man välja att presentera data i ett histogram Figur 9, där den vertikala axeln är antalet mätpunkter (av totalt 400 st), och den horisontella axeln visar staplar uppdelad på ett på förhand valt intervall av hårdhet. Nästa steg blir att identifiera den mixade fördelningsfunktionen. För exemplet med SS 0727 blir det bäst lämpade en funktion sammansatt av tre Weibullfördelningar med utseendet enligt *Ekvation 30*.

$$F_w = (1 - \chi - \psi) \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \right] + \chi \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\delta}\right)^\gamma} \right] + \psi \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\epsilon} \right] \text{Ekvation 30}$$

Genom att sedan sätta lämpliga startvärden och sedan använda sig av minsta kvadratmetoden med avseende på uppmätta värden erhålls fördelningen i Figur 10. Den röda linjen visar då funktionens värde och den blåa linjen visar de faktiska värdena från mätningen.

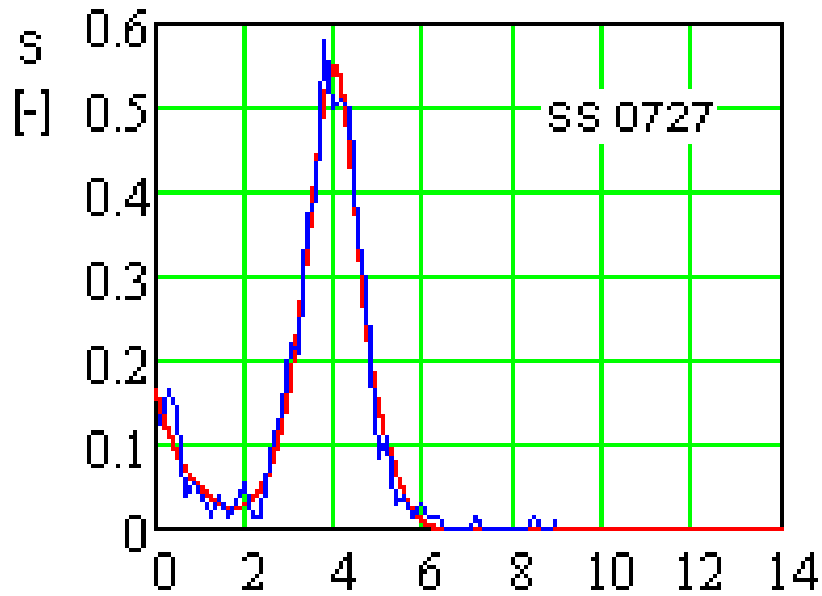


Figur 9 Frekvensfunktionen för nanohårdheten i segjärn SS 0727.



Figur 10 Mätt och modellerad fördelningsfunktion för nanohårdheten för SS 0727.

Presenterar man resultatet som en täthetsfunktion erhålls diagrammet i Figur 11.



Figur 11 Mätt och modellerad frekvensfunktion för nanohården för SS 0727.

Arbetsmaterialets hårdhet är vanligtvis knuten till materialets deformationsmotstånd, vilket också ger ett ökat skärmotstånd. Ett hårt arbetsmaterial medför också att skärhastigheten måste sänkas, samt en ökad risk för progressiv verktygsförslitning. Skärbarheten försämras därmed med ökad hårdhet [2].

2.6.2 METODIK VID FRAMTAGNING AV POLÄRDIAGRAM

Dessa materialfaktorer kan sammanfattas i polärddiagram, där ett givet referensmaterial ligger till grund för en bedömning av den relativa skärbarheten. Ett utmärkt referensmaterial vid svarvning är SS 2244. Höga siffror på materialfaktorerna, hårdhet, abrasivitet, duktilitet samt deformationshårdnande i polärddiagrammen betyder att skärbarheten påverkas negativt. Undantaget är materialfaktorn värmeledningsförmåga, där ett lågt värde leder till sämre skärbarhet. Skalan för de olika materialfaktorerna löper från 1 till 10.

Tabell 6 Materialfaktorer i ett polärt diagram för beskrivning av den potentiella skärbarheten.

Materialfaktor	Fysikalisk beskrivning	Mätetal	Enhet
Abrasivitet	Kvalitativ skala	1-10	[-]
Duktilitet	Brottförlängning	ε_b	[%]
Deformationshårdnande	Deformationshårdnadsfaktor	Dn	[-]
Värmeledningsförmåga	Termisk konduktivitet	K	[W/mK]
Hårdhet	Lastbärhets förmåga	HB (HV)	[N/mm ²]

Ett materials relativa duktilitet, deformationshårdnad, hårdhet, och abrasivitet beräknas med Ekvation 31 och relativa termiska värden räknas ut med Ekvation 32 [3].

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

Ekvation 31

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

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

Ekvation 32

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

Där M_x = relativa värdet för materialfaktorn

X = uppmätt värde på storheten

R = uppmätt värde på referensmaterialet

G_{max} = maximalt värde på hårdheten

G_{min} = minimalt värde på hårdheten

Med G_{min} och G_{max} enligt Tabell 7, så skulle de relativa värden mellan referensmaterial (SS 2244) och Inconel 718 se ut enligt Tabell 8.

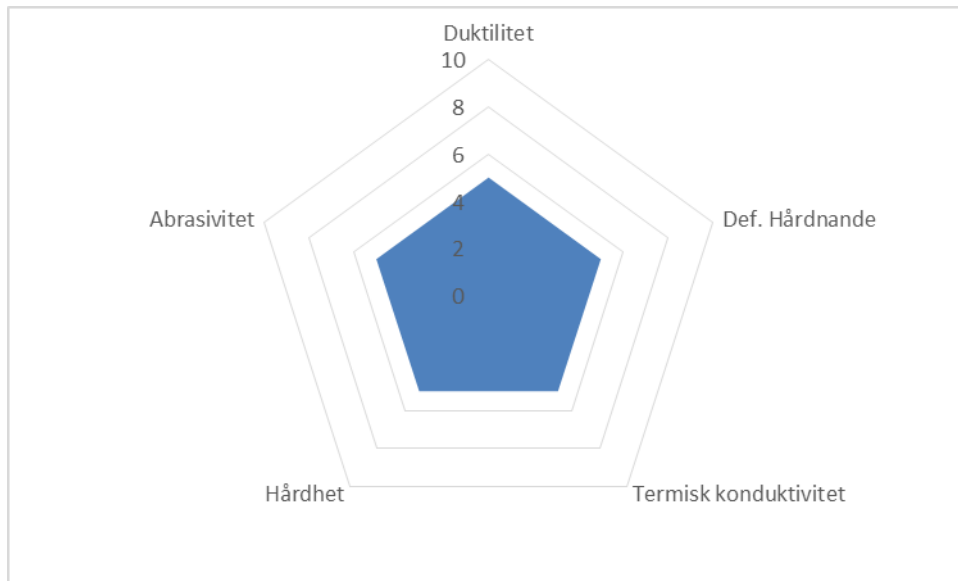
Följande polärddiagram för Inconel 718 skulle då få utseendet enligt Figur 13, samt polärddiagrammet för SS 2244 skulle per definition få utseendet enligt Figur 12.

Tabell 7 G_{min} och G_{max} .

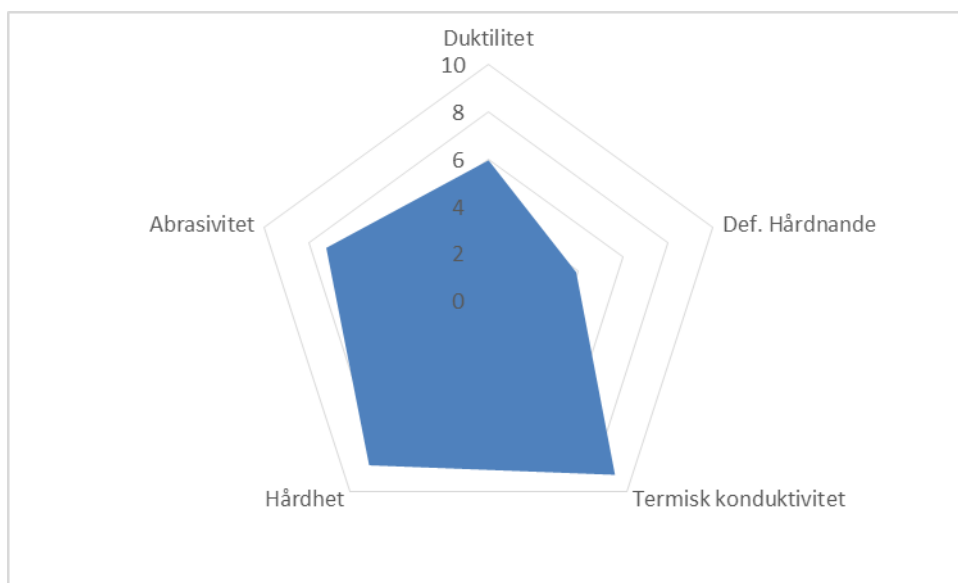
Materialfaktor	G_{min}	G_{max}
Abrasivitet	1	10
Duktilitet	1	60
Deformationshårdnande	0	4
Termisk konduktivitet	5	180
Hårdhet	70	600

Tabell 8 Framtagning av data för polära digaram för materialen SS 2244 och Inconel 718.

Materialfaktor	SS 2244		Alloy718	
	Egenskaps värde	Relativt värde	Egenskaps värde	Relativt värde
Duktilitet	12	5	21	5.24
Deformationshårdnande	1.54	5	1.20	4.34
Termisk konduktivitet	34	5	12.1	9.21
Hårdhet	230 [HB]	5	422 [HB]	7.59
Abrasivitet	5	5	6.53	7.23



Figur 12 Polärddiagram för arbetsmaterialet SS 2244.



Figur 13 Polärddiagram för arbetsmaterialet Inconel 718.

Utifrån dessa polärddiagram kan man sedan göra ändringar i skärdata, för att styra skärbarhetens uppträdande. Tabell 9 Faktorer och åtgärder [2] nedan beskriver vilka åtgärder som i första hand bör vidtagas vid upplevd problematik beroende på materialfaktor [2].

Tabell 9 *Faktorer och åtgärder [2].*

Problem beroende på faktor	Första åtgärd
Abrasivitet	Öka ingreppsarean mot verktyget
Duktilitet	Öka skärhastigheten
Deformationshårdnande	Variera skärdjup och öka matningen
Värmeledningsförmåga	Sänk skärhastigheten och sänk matningen
Hårdhet	Minska skärdjupet och sänk matningen

2.7 Cr₁ som funktion av materialets egenskaper

Schultheiss *et al.* [36] har undersökt förhållandet mellan materialparametrar och Cr₁. I artikeln presenteras en modell för att beräkna Cr₁ som funktion av fyra materialparametrar. De materialparametrar som anses ha högst betydelse för skärbarheten undersöktes av Andersson, Ståhl [37] med slutsatsen att duktilitet, hårdhet, termisk konduktivitet, töjningshärdning och abrasivitet har störst inflytande på skärbarheten hos ett material.

I modellen för att beräkna Cr₁ så används hårdheten (*HV*), sträckgränsen (*R_p*), brotttöjningen (*ε_b*) och den Termiska konduktiviteten (*k*).

$$Cr_1 = \alpha \cdot HV^\delta + \beta \cdot R_p^\nu + \gamma \cdot \varepsilon_b^\eta + \xi \cdot k^\omega \quad \text{Ekvation 33}$$

Konstanter som presenteras i artikeln är framtagna av Schultheiss. Konstanterna delas upp i specifika material grupper men även allmängiltiga som skall gälla alla material grupper:

Tabell 10 Konstanter för analytisk beräkning av skärmotståndsparametern Cr₁.

Egenskap	Konstant	Alla	P	M	N	S
Hårdhet, HV [kp/mm ²]	α	12.8	13.8	12.4	10.0	9.6
	δ	0.79	0.80	0.78	0.75	0.72
Sträckgräns R _p [MPa]	β	-13.0	-20.7	-2.8	-63.1	4.2
	ν	0.07	0.50	0.74	0.35	0.65
Brottöjning ε _b [%]	γ	543	679	542	806	564
	η	0.15	0.16	0.12	0.04	0.16
Termisk konduktivitet [W/mK]	ξ	-3.10	-2.60	-5.37	-1.65	7.50
	ω	1.09	1.11	1.31	0.99	1.44

3 RESULTAT

I detta kapitel presenteras resultaten för de genomförda experimentella studierna. En del av diagrammen och tabellerna redovisas i appendix för ökad läsbarhet.

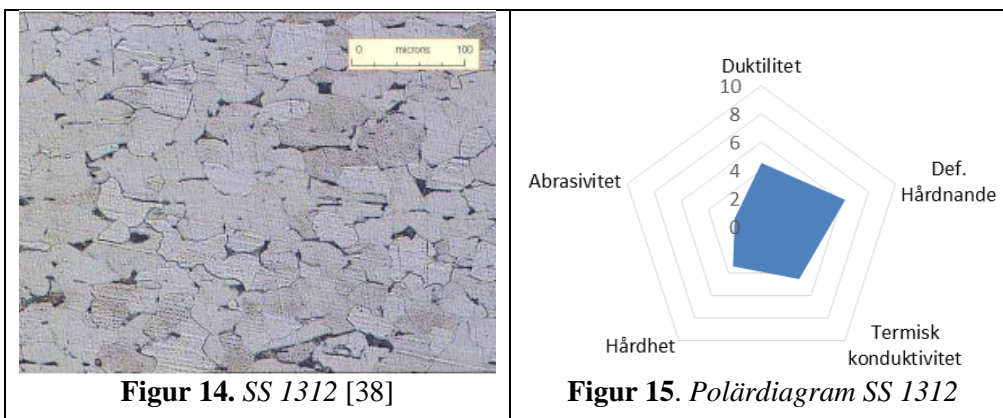
3.1 Arbetsmaterial

Inledande presenteras resultaten ifrån materialstudier där mikrostruktur och polär-diagram samt sammansättningen av samtliga material vi undersökt redovisas.

3.1.1 MATERIALGRUPP P

3.1.1.1 SS 1312 S235JR

I mikrostrukturen av SS 1312 så är ferriten ljus och de mörka fälten perlit.



Figur 14. SS 1312 [38]

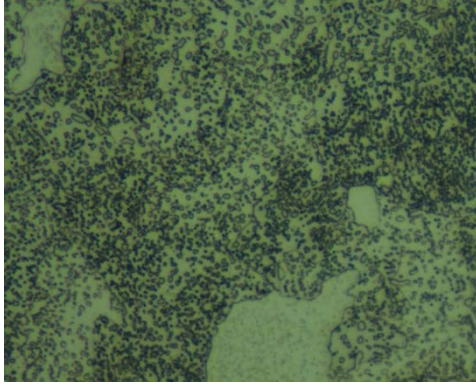
Figur 15. Polär-diagram SS 1312

Tabell 11 Sammansättning för SS 1312 [39].

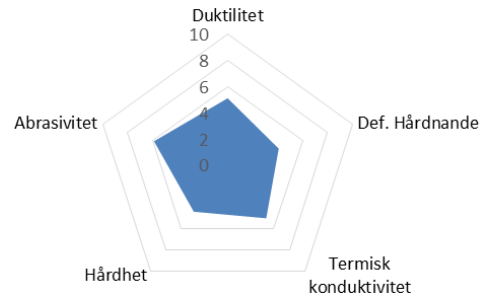
SS 1312	C %	Mn %	P %	S %	N %	Cu %
	0.19	1.50	0.045	0.045	0.12	0.40

3.1.1.2 SS 2258

I mikrostrukturen för SS 2258 så är de ljusare beståndsdelarna ferrit och mörka sfärodit, alltså ferrit med cementit.



Figur 16. SS 2258 Förstoring x1000.



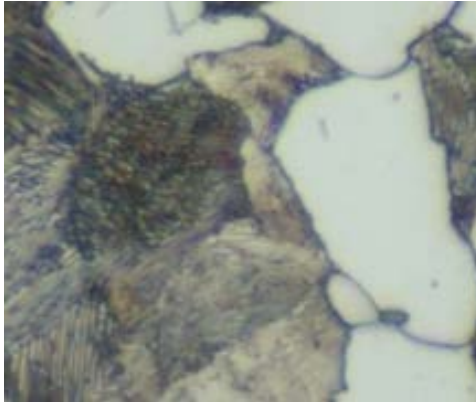
Figur 17. Polär diagram SS 2258

Tabell 12 Sammansättning SS 2258 [40].

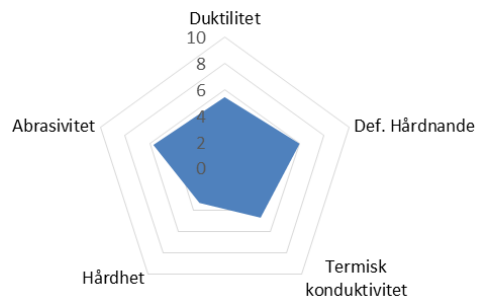
SS 2258	C%	Si%	Mn%	S%	Cr%	Mo%	Ni%
Min	0.95	0.20	0.25	-	1.35	-	-
Max	1.00	0.35	0.40	0.015	1.60	0.08	0.5

3.1.1.3 SS 1672

Figur 18. SS1672 x1000 förstoring visar SS 1672, där de vita fälten är ferrit och de mörka fälten är perliten, d v s lameller av ferrit och cementit. Mikrostrukturen innehåller också stora mängder hårda partiklar.



Figur 18. SS1672 x1000 förstoring



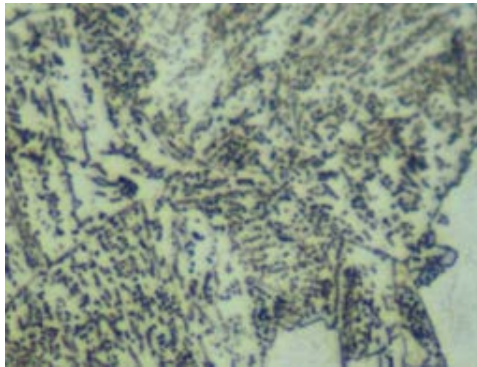
Figur 19. Polärdiagram för SS1672.

Tabell 13 Sammansättning SS 1672 [40].

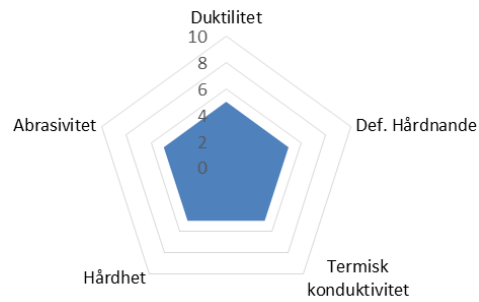
SS 1672	C %	Si %	Mn %	P %	S %
Min	0.42	0.15	0.50	-	-
Max	0.50	0.40	0.80	0.030	0.035

3.1.1.4 SS 2244

Figur 20 visar SS 2244, där mikrostrukturen är perlit och ferrit bredvid visas polär-diagrammet för SS 2244 som är referensmaterialet. Tabell 14 visar den kemiska sammansättningen av SS 2244.



Figur 20 SS2244 x1000 förstoring.



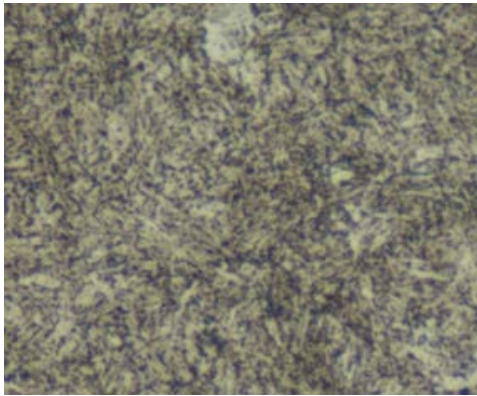
Figur 21 Polär-diagram för SS2244

Tabell 14 Sammansättning SS 2244 [40].

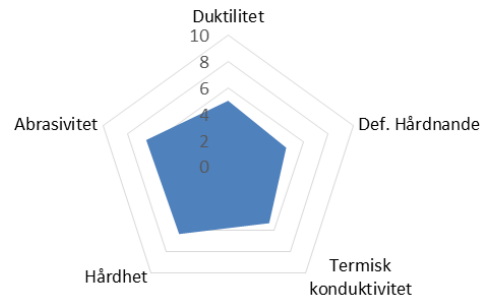
SS 2244	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %
Min	0.38	0.15	0.60	-	-	0.90	0.15
Max	0.45	0.40	0.90	0.025	0.035	1.20	0.30

3.1.1.5 SS 2541

Förstoring visar mikrostrukturen av SS 2541 där materialet består av martensit. Figur 23 visar polärddiagrammet och Tabell 15 visar sammansättningen för samma material.



Figur 22 SS 2541 förstoring x1000



Figur 23 Polärddiagram SS 2541

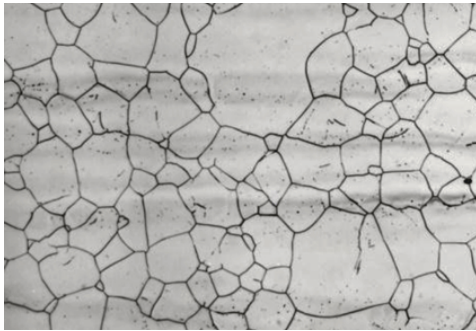
Tabell 15. Sammansättning SS 2541 [40]

SS 2541	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%
Min	0.30	0.15	0.50	-	-	1.30	1.30	0.15
Max	0.38	0.40	0.80	0.025	0.035	1.70	1.70	0.30

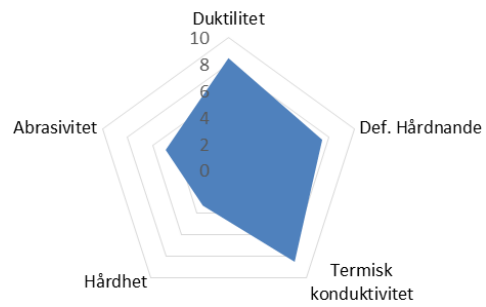
3.1.2 MATERIALGRUPP M

3.1.2.1 SS 2348 / 316L

Mikrostruktur bestående av austenit med tydliga korngränser.



Figur 24 SS 2348



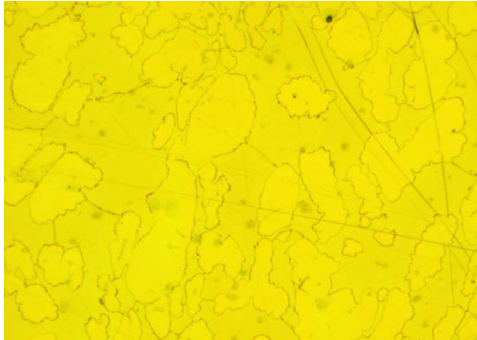
Figur 25. Polärdiagram SS 2348

Tabell 16 Sammansättning SS2348 [41]

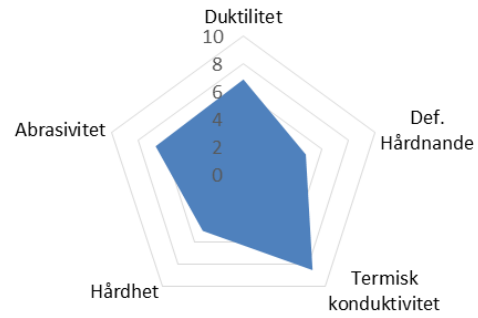
SS 2348	C %	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%
	0.030	0.3	1.8	0.040	0.030	17	10	2.1

3.1.2.2 LDX 2101

Mikrostruktur bestående av austenit och ferrit.



Figur 26. LDX 2101 [30]



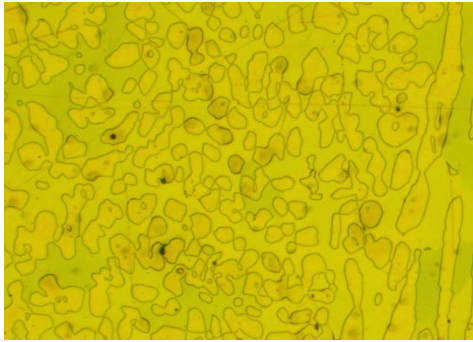
Figur 27. Polärdiagram LDX 2101

Tabell 17. Sammansättning LDX 2101 [41]

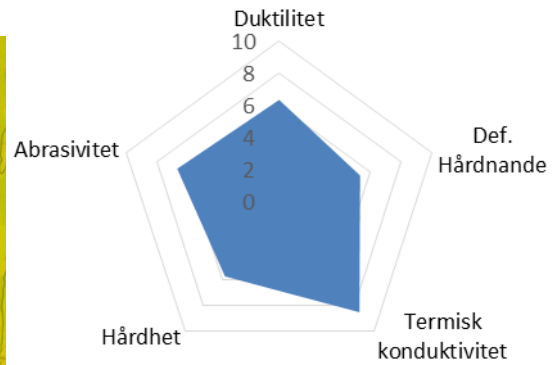
LDX 2101	C%	N%	Cr%	Ni%	Mo%	Annat
	0.03	0.22	21.5	1.5	0.3	5 Mn Cu

3.1.2.3 SAF 2205

Mikrostruktur bestående av austenit och ferrit.



Figur 28. SAF 2205 [30]



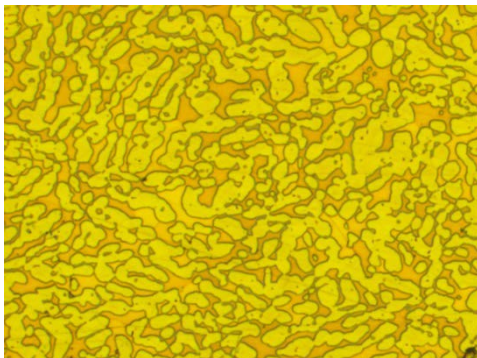
Figur 29. Polärddiagram SAF 2205.

Tabell 18. Sammansättning SAF 2205 [41]

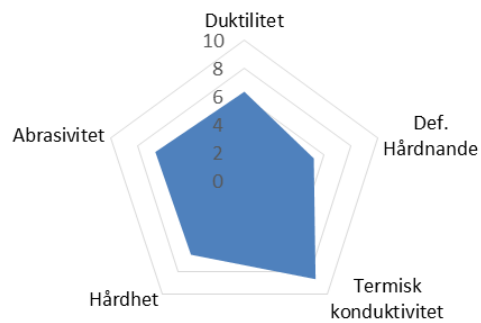
SAF 2205	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	N%
	0.030	1.0	2.0	0.030	0.015	22	5	3.2	0.18

3.1.2.4 SAF 2507

Mikrostruktur bestående av austenit och ferrit.



Figur 30. SAF 2507 [30]



Figur 31. Polärddiagram SAF 2507

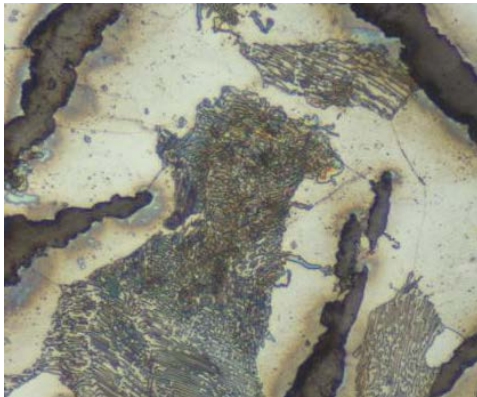
Tabell 19. Sammansättning SAF 2507 [41]

SAF 2507	C%	N%	Cr%	Ni%	Mo%
	0.02	0.27	25.0	7.0	4.0

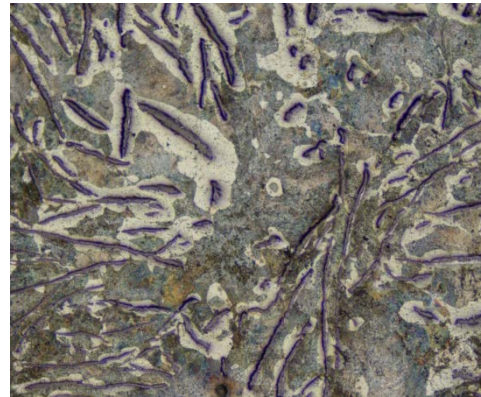
3.1.3 MATERIALGRUPP K

3.1.3.1 SS 0125 Gråjärn

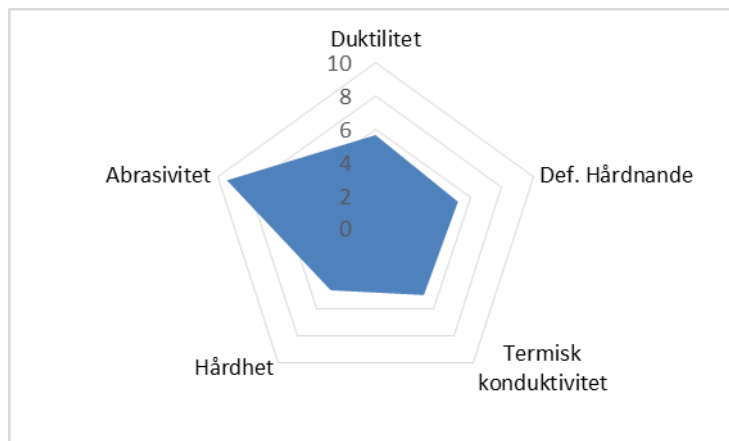
Grafitflagor som mörka linjer enhetligt fördelade med slumpmässig orientering. Matrisfasen är perlit och ferrit.



Figur 32 SS 0125 x1000 förstoring



Figur 33 SS 0125 x100 förstoring



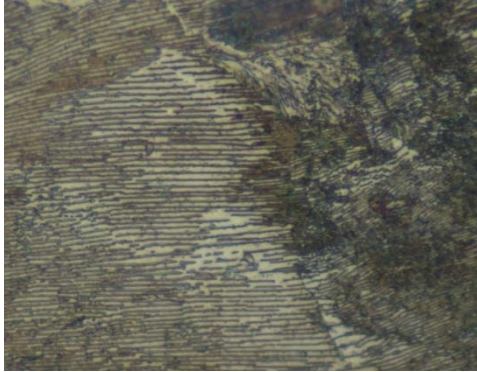
Figur 34. Polärdiagram SS 0125

Tabell 20. Sammansättning SS 0125 [40]

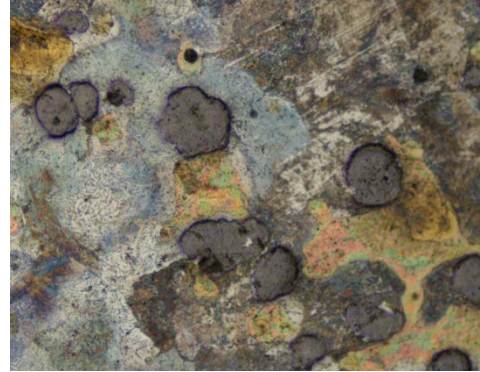
SS 0125	C%	Si%	Mn%	P%	S%
Min	2.9	1.8	0.50	-	-
Max	3.65	2.90	0.70	0.30	0.07

3.1.3.2 SS 0727 Segjärn

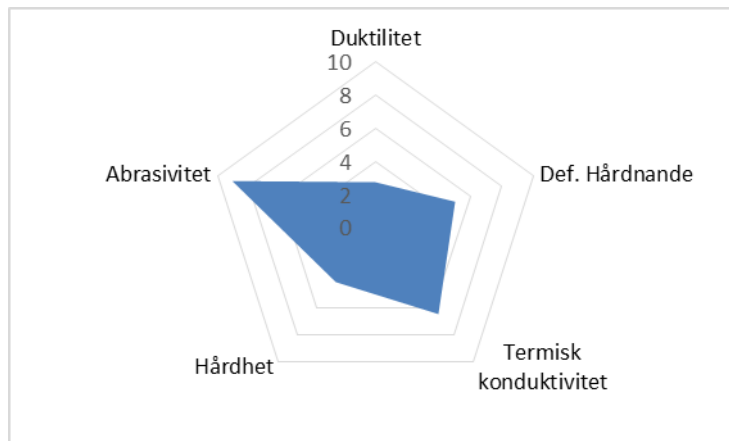
I materialstrukturen uppträder grafit i sin sfäriska form med perlit och ferrit som matrisfasen.



Figur 35 SS 0727 förstoring x1000



Figur 36 SS 0727 förstoring x100



Figur 37. Polärdiagram SS 0727

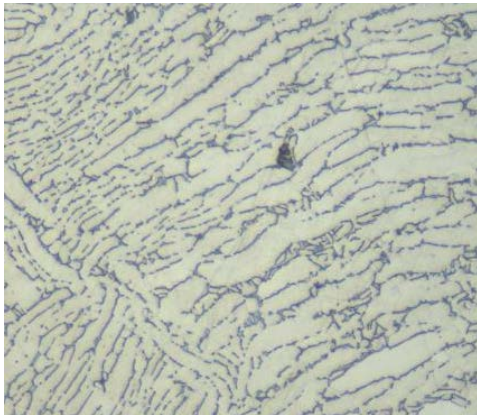
SS 0727	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Mg%	Ni%
Min	3.2	1.5	0.05			0.02	
Max	4.0	2.8	1.0	0.08	0.02	0.08	2.0

Tabell 21. Sammansättning SS 0727 [42]

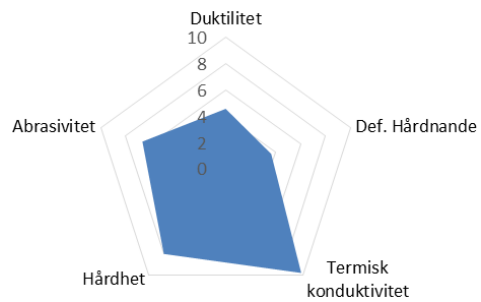
3.1.4 MATERIALGRUPP S

3.1.4.1 Titan 6-4 / TiAl6V4

Mikrostrukturen i alfa-beta legeringen Ti6Al4V, alfafasen är ljusare och betafasen mörkare.



Figur 38 Titan 6-4

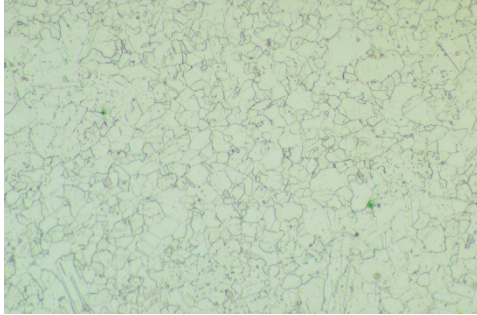


Figur 39. Polärddiagram Titan 6-4

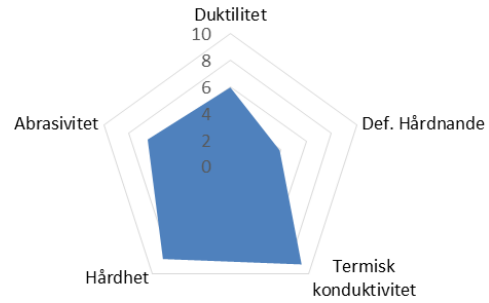
Tabell 22. Sammansättning Titan 6-4 [43]

Titan 6-4	C%	Al%	H%	Fe%	N%	O%	V%	Ti%
Min	-	5.5	-	-	-	-	3.50	Balanserat
Max	0.008	6.75	0.015	0.025	0.05	0.2	4.5	

3.1.4.2 Inconel 718



Figur 40 Inconel 718 Förstoring x1000



Figur 41. Polär diagram Inconel 718

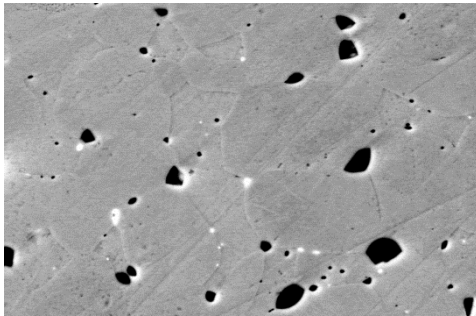
Tabell 23. Inconel 718 Sammansättning [%] [32]

Ni%	Cr%	Mo%	Nb%	Al%	Ti%	Fe%	Mn%	Si%	C%
52.5	19	3.0	5.1	0.5	0.9	18.5	0.2	0.2	0.04

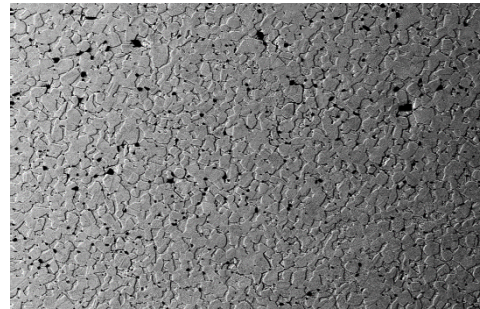
3.1.5 MATERIALGRUPP N

3.1.5.1 CW614N CuZn39Pb3

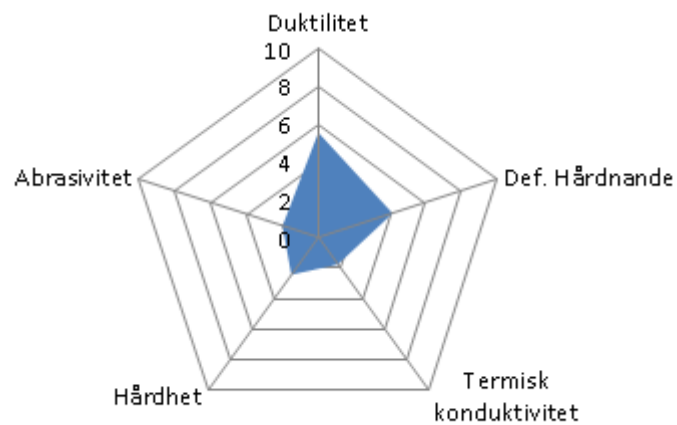
I Figur 42 ser vi att blyet framträder som mörka prickar. Korngränser syns svagt.



Figur 42. CW614N Mässing med bly
x5770 Förstoring [30]



Figur 43. CW614N Mässing med bly
x617 förstoring

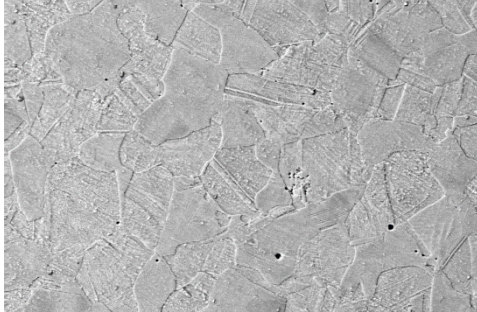


Figur 44. Polärdiagram CW614N

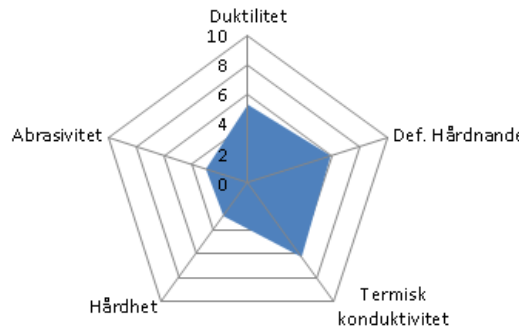
Tabell 24 CW614N Sammansättning [%] [44]

CW614N	Cu%	Al%	Fe%	Ni%	Pb%	Sn%	Zn%
Min	57.0	-	-	-	2.50	-	Balanserat
Max	59.0	0.05	0.30	0.30	3.50	0.30	

3.1.5.2 CW724R 'Ecobrass'



Figur 45. CW724R 'Ecobrass' x2150 förstoring [30]



Figur 46. Polärdiagram CW724R

Tabell 25 CW724R Sammansättning [%] [44]

CW724R	Cu%	Si%	P%	Zn%	Pb%
	76	3	0,05	balanserat	Max 0,09

3.2 Statiska skärkrafter

Nedan presenteras resultaten ifrån försöken ämnade att analysera de statiska skärkrafterna i arbetsmaterialen.

3.2.1 SKÄRMOTSTÅND OCH SPECIFIK SKÄRKRAFT: KONSTANTER

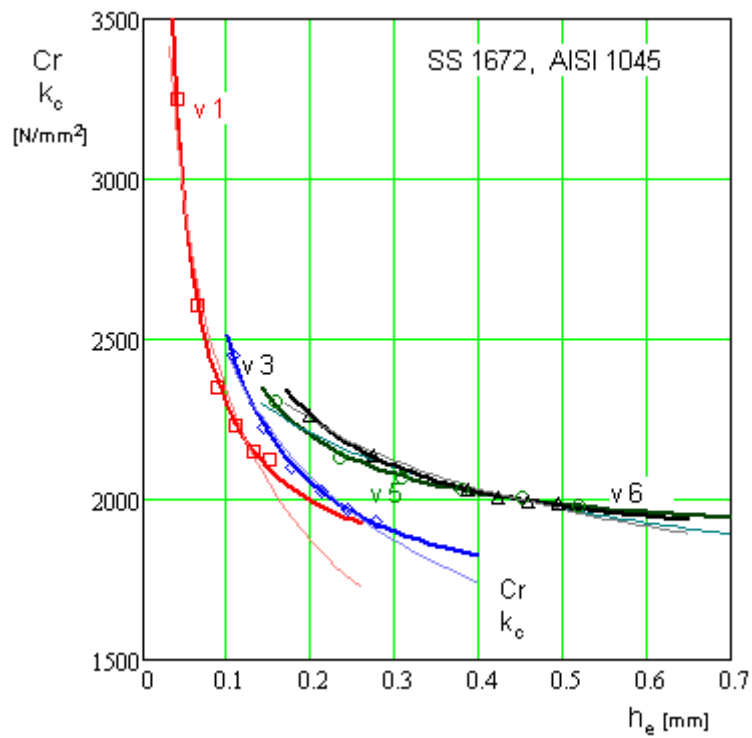
Metodiken som redogjordes för i avsnitt 2.2.1.1 på sida. 10, användes för beräkning av konstanter till modeller för skärmotstånd samt specifik skärkraft. Totalt 164 matningstrappor utgör underlaget för beräkningen av de statiska skärkraftskonstanterna.

Generellt blev modellfelen mycket litet som t.ex. för SS 2348:

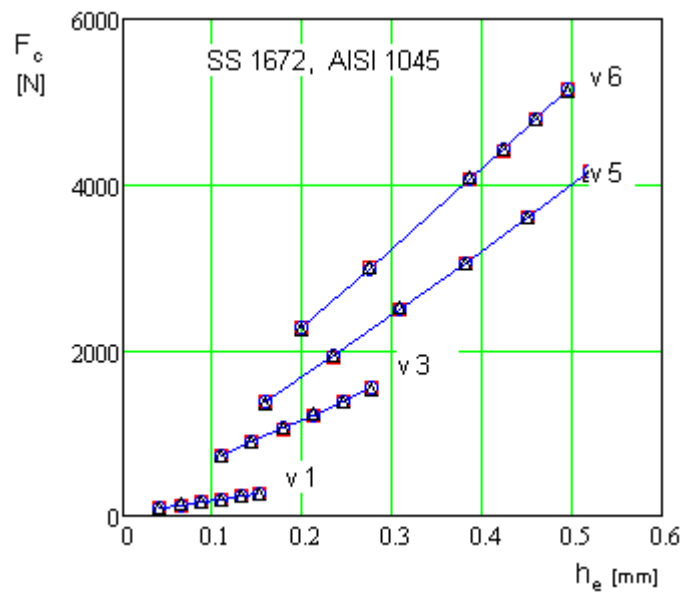
Tabell 26 Konstanter och modellfel i mtrl SS 2348/ AISI 316L

Material SS 2348, AISI 316L						
Vändskär	Cr ₁	Cr ₂	Er[%]Cr	k _{c11}	m _c	Er[%]k _c
Vertkyg 2	1804	73,6	1,0	1383	0,27	0,352
Vertkyg 3	1482	85,5	0,2	1283	0,25	0,765
Vertkyg 5	1778	91,3	0,3	1747	0,16	1.1
Verkyg 7	1917	61,3	0,97	1523	0,23	0,23

Där högsta felet är 1.1 % för skäret verktyg 5 med Kienzle modellen. Generellt ligger modellfelen för alla material och skär mellan 0-3% fel. Resultat för alla material presenteras i Appendix D Statiska Skärkrafter.



Figur 47 Cr och k_c som funktion av h_e i SS 1672



Figur 48 F_c som funktion av h_e i SS 1672

I Figur 48 är kraften från försöken plottade som punkter och den återskapade kraften ifrån våra modellkonstanter som linjer. Diagram för de övriga materialen är presenterade i appendix B.

För att modellerna ska vara praktiskt tillämpbara behövs konstanter för varje materialgrupp som gäller godtyckligt för alla material i gruppen och alla skär avsedda för de materialen. För att räkna ut sådana konstanter tillämpade vi Levenberg-Marquardt [9] [10] igen, men istället för enskilda konstanter för varje skär söktes minsta fel för alla skär i ett och samma material samtidigt Ekvation 34 samt Ekvation 35 . Konstanter för Cr modellen presenteras i Tabell 27 och för Kienzle modellen i Tabell 29.

$$\begin{aligned} & \text{Min}(Cr_1, Cr_2) \\ &= \sum_j \left[\left(\frac{F_{c_{j-1}} - \left(Cr_1 + \frac{Cr_2}{h_{eW_{j-1}}} \right) \cdot A_{j-1}}{F_{c_{j-1}}} \right)_1 + \left(\frac{F_{c_j} - \left(Cr_1 + \frac{Cr_2}{h_{eW_j}} \right) \cdot A_j}{F_{c_j}} \right) \dots \right]^2 \end{aligned}$$

Ekvation 34

$$\begin{aligned} & \text{Min}(k_{c1.1}, m_c) \\ &= \sum_j \left[\left(\frac{F_{c_{j-1}} - \left(k_{c1.1} \cdot h_{eW_{j-1}}^{-m_c} \right) \cdot A_{j-1}}{F_{c_{j-1}}} \right)_1 + \left(\frac{F_{c_j} - \left(k_{c1.1} \cdot h_{eW_j}^{-m_c} \right) \cdot A_j}{F_{c_j}} \right) \dots \right]^2 \end{aligned}$$

Ekvation 35

Tabell 27 Resultat konstanter Cr-modellen

mtrl grupp	SS	DIN	Cr ₁	Cr ₂	fel [%]					
					V1	V2	V3	V4	V5	V6
P2	1312	ST 37-3	1972	66	10.6	13.8	2.7	1.6		
P3	V-2158-60	16 MnCr 5	1760	76	10.5	11.3	1.1	0.7		
P4	1672	C 45E	1734	74	8.4	2.5	4.8	5.6		
P5	2244	42 CrMo 4	1876	75	6.4	9.6	1.2	2		
P7	2258	100 Cr 6	1941	69	5.6	6.9	8.5	7.2		
P8	2541	34 CrNiMo 6	1835	75	4.1	4.9	1.6	1.6		
K1	0125	EN-GJL-250	872	87			5.3	2.5	3.9	
K4	0727	EN-GJS-500-7	1244	113			4.6	2.3	4.6	
S3	Inconel 718		2280	113		3.6	3.3			
S12	TiAl6V4		1467	70		3.7	4			
N11	5170	CW614N	656	32		4.6	4.3			
N11		CW724R	825	47		3.7	3.3			
M3	2348	X2 CrNiMo 17 13 2	1736	75		2.4	3.6	4.7		
M4	SAF2205	X2CrNiMoN 22 5 3	1920	69		1.3	2.9	2		
M4	LDX 2101		1742	78		2.4	2.3	2.7		
M5	SAF2507	X2CrNiMoN 25 7 4	2065	59		1.9	5.6	3.7		

Tabell 28. Medel och maximala fel i procent för de olika vändskären.

Fel %	Verktyg 1	Verktyg 2	Verktyg 3	Verktyg 4	Verktyg 5	Verktyg 6
Max	10.6	4.6	13.8	5.3	8.5	7.2
Medel	7.6	3.0	5.6	5.0	3.2	3.4

Tabell 29 Resultat konstanter k_c modellen

mtrl grupp	SS	DIN	$k_{c1.1}$	m_c	fel [%] (kc)						
					V1	V2	V3	V4	V5	V6	
P2	1312	ST 37-3	1834	0.15	11.5		15.4		3	1	
P3	V-2158-60	16 MnCr 5	1633	0.18	11.7		13.2		2.8	2.3	
P4	1672	C 45E	1536	0.22	8.9		5		5.4	7	
P5	2244	42 CrMo 4	1689	0.2	8		12.6		3	3.1	
P7	2258	100 Cr 6	1818	0.16	6.7		8.5		8.5	6.7	
P8	2541	34 CrNiMo 6	1648	0.2	5.3		8		2.2	1.2	
K1	0125	EN-GJL-250	833	0.36					3.4	3.1	4.4
K4	0727	EN-GJS-500-7	1015	0.39					1.5	1.7	3.1
S3	Inconel 718		1741	0.3		2.4	1.9				
S12	TiAl6V4		1129	0.29		2.7	2.7				
N11	5170	CW614N	531	0.27		4.3	4.3				
N11		CW724R	657	0.3		2.1	2.3				
M3	2348	X2 CrNiMo 17 13 2	1490	0.23		1.7	2.2		7.4		
M4	SAF2205	X2CrNiMoN 22 5 3	1707	0.18		1.6	3.7		3.6		
M4	LDX 2101		1545	0.2		0.9	3.9		3.4		
M5	SAF2507	X2CrNiMoN 25 7 4	1878	0.15		2.4	6.3		4.3		

Tabell 30. Medel och maximala fel i procent för de olika vändskären

Fel %	Verktyg 1	Verktyg 2	Verktyg 3	Verktyg 4	Verktyg 5	Verktyg 6
Max	11.7	4.3	15.4	3.4	8.5	7.0
Medel	8.6	2.3	6.4	2.5	4.0	3.6

För att ytterligare förenkla för en presumtiv användare av tabulerade värden beräknades även konstanter där endast Cr_1 och $k_{c1.1}$ tilläts variera, medan Cr_2 samt m_c bestämdes konstant inom varje materialgrupp. Cr_2 och m_c valdes som medelvärdet av de båda konstanterna ifrån föregående resultat. Samma metod tillämpades för att söka minsta modellfel på Cr_1 respektive $k_{c1.1}$. Resultatet presenteras i *Tabell 31* och *Tabell 33*.

Tabell 31. Resultat Cr_1 med konstant Cr_2

mtrl grupp	SS	DIN	Cr_1	Cr_2	fel [%]					
					V1	V2	V3	V4	V5	V6
P2	1312	ST 37-3	1934	73	9.7	14.0	3.3	1.2		
P3	V-2158-60	16 MnCr 5	1773		11.0	11.3	0.8	0.5		
P4	1672	C 45E	1739		8.2	2.5	4.7	5.5		
P5	2244	42 CrMo 4	1889		7.0	9.6	1.0	1.7		
P7	2258	100 Cr 6	1919		4.9	7.0	8.8	6.7		
P8	2541	34 CrNiMo 6	1848		4.2	4.9	1.6	1.8		
K1	0125	EN-GJL-250	834		100			6.0	1.1	4.1
K4	0727	EN-GJS-500-7	1304	4.1		3.0	5.9			
S3	Inconel 718		2431	92	3.1	5.0				
S12	TiAl6V4		1304		6.9	2.2				
N11	5170	CW614N	599	40	5.4	3.2				
N11		CW724R	869		3.3	4.5				
M3	2348	X2 CrNiMo 17 13 2	1602	70	3.3	8.8	5.7			
M4	SAF2205	X2CrNiMoN 22 5 3	1913		1.3	3.7	3.8			
M4	LDX 2101		1784		2.4	2.3	2.8			
M5	SAF2507	X2CrNiMoN 25 7 4	2003		2.3	5.5	4.5			

Tabell 32. Medel och maximala fel i procent för de olika vändskären

Fel %	Verktyg 1	Verktyg 2	Verktyg 3	Verktyg 4	Verktyg 5	Verktyg 6
Max	11.0	6.9	14.0	6.0	8.8	6.7
Medel	7.5	3.5	6.0	5.0	3.4	3.4

Tabell 33. Resultat $k_{c1.1}$ med konstant m_c

mtrl grupp	SS	DIN	$k_{c1.1}$	m_c	fel [%] (kc)					
					V1	V2	V3	V4	V5	V6
P2	1312	ST 37-3	1627	0.23	6.8	16.6	6.4	4.3		
P3	V-2158-60	16 MnCr 5	1517		8.8	14.0	4.8	4.3		
P4	1672	C 45E	1504		9.3	5.1	5.9	7.7		
P5	2244	42 CrMo 4	1609		5.7	13.0	4.3	4.6		
P7	2258	100 Cr 6	1620		2.2	9.7	11.1	3.3		
P8	2541	34 CrNiMo 6	1582		3.3	8.3	3.2	2.3		
K1	0125	EN-GJL-250	790		0.38			4.0	4.2	5.2
K4	0727	EN-GJS-500-7	1025				1.4	1.8	3.2	
S3	Inconel 718		1745	0.3	2.4	2.0				
S12	TiAl6V4		1112		2.9	2.4				
N11	5170	CW614N	507	0.29	3.8	3.8				
N11		CW724R	668		2.2	2.6				
M3	2348	X2 CrNiMo 17 13 2	1468	0.19	3.9	10.3	6.4			
M4	SAF2205	X2CrNiMoN 22 5 3	1688		1.4	3.7	3.8			
M4	LDX 2101		1604		1.9	3.8	2.4			
M5	SAF2507	X2CrNiMoN 25 7 4	1752		1.9	6.2	5.6			

Tabell 34. Medel och maximala fel för de olika vändskären

Fel %	Verktyg 1	Verktyg 2	Verktyg 3	Verktyg 4	Verktyg 5	Verktyg 6
Max	9.3	3.9	16.6	4.0	11.1	7.7
Medel	6.0	2.6	7.2	2.7	5.0	4.4

3.2.2 MÄTDATA VALIDERING

För att undersöka noggrannheten i våra mätningar med Kistlergivaren gjordes försök med 25 identiska matningstrappor för att kunna studera avvikelser och bedöma giltigheten i insamlad mätdata. Mätningarna utfördes i SS 2244 Med verktyg 5, då det fick representera ett medel av de andra försöken.

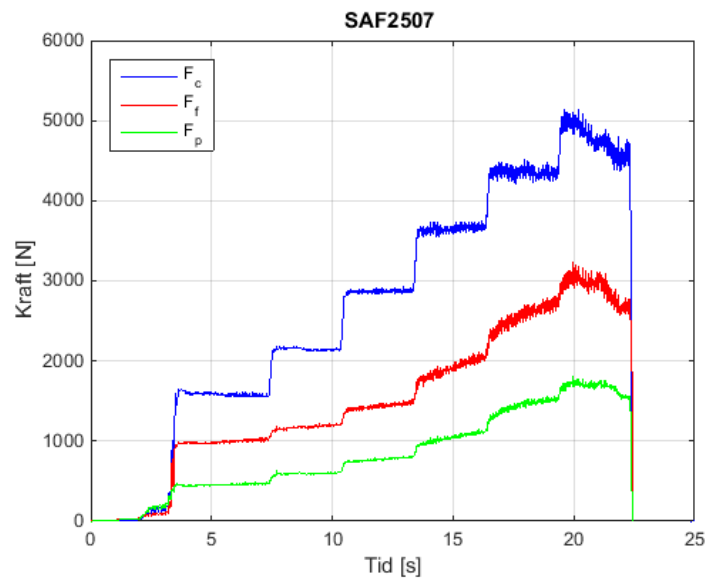
Tabell 35 statistik för 25 trappor

Matning [mm/rev]	Min [N]	Max [N]	Medel [N]	Varians [N²]	Std. Avv. [N]	Variations koeff. [%]
0.2	1283	1355	1317	456.7	21.4	1.6
0.3	1784	1896	1937	952.5	30.9	1.7
0.4	2309	2427	2368	1177	34.3	1.4
0.5	2816	2978	2891	2314	48.1	1.7
0.6	3371	3569	3458	3328	57.7	1.7
0.7	3929	4158	4029	3722	61.0	1.5
Medel				1992	42.2	1.6

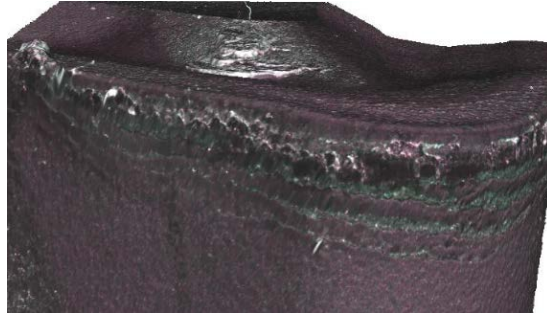
Med standardavvikelse på 21.4-61 N och variationskoefficienter på 1.4–1.7 % över de olika matningarna anser att vi kan bestämma skärkrafter med mycket bra noggrannhet med befintlig utrustning.

3.2.3 PLASTISK DEFORMATION

Vid försöken så uppstod problem i vissa material med plastisk deformation. För att motverka detta och få bättre avläsning av de statiska krafterna så var det nödvändigt att minska matningen. För att exemplifiera, så ett försök med verktyg 5 vändskär i SAF 2507 med skärhastigheten 135 m/min , skärdjupet 3 mm och matningsstegen 0.2 , 0.3 , 0.4 , 0.5 , 0.6 och 0.7 mm/varv resulterade i följande krafter Figur 49. Diagrammet visar hur matning- och passivkraften ökar när nosen börjar deformeras. När nosen sedan deformeras plastiskt så mycket att nosen är nära haveri så sjunker alla krafterna drastiskt som ett resultat av att vi inte har lika stor del av skäret i ingrepp längre.



Figur 49. Matningstrappa plastiskdeformation



Figur 50. *Plastiskdeformation av nosen på vändskär*

Figur 50. visar skäret efter försöket det kan konstateras att skäret hade utsatts för plastisk deformation, d v s att skärverktyget hade fått en formförändring, utan någon materialförlust. Geometriskt gör plastiskdeformation att verktygets lastbärande förmåga ökar.

Plastisk deformation leder också till att verktyget på kort sikt erhåller ett förbättrat spänningstillstånd, vilket Figur 49 visar. Samtidigt ökar dock den termiska och mekaniska belastningen på verktyget. Viss plastisk deformation fick dock tolereras, framförallt vid finare skär där plastisk deformation uppstod vid relativt låg skärdata, men för att ändå få en uppfattning över skärkrafterna över hela applikationsområdet för skäret så fick en del plastisk deformation tolereras i de sista trappstegen.

3.3 Dynamiska Skärkrafter

Mätningar av dynamiska skärkrafter utfördes i en manuell svarv med kraftgivaren utvecklade på LTH.

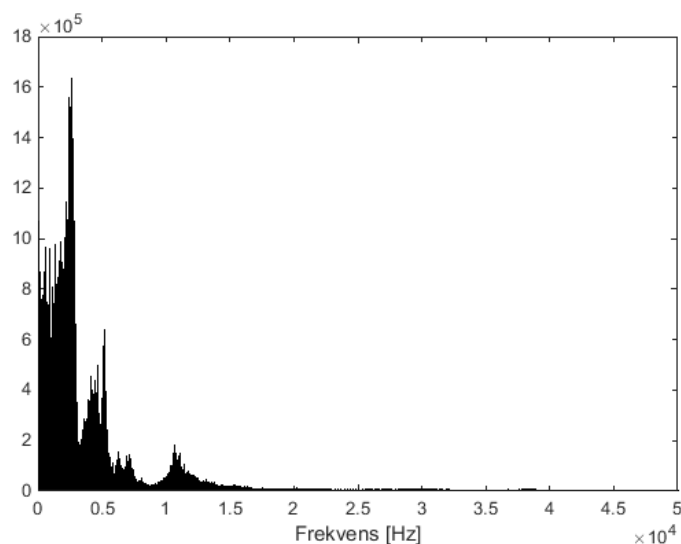
Mätningar av dynamiska skärkrafter gjordes i sex material:

Tabell 36. Skärdata dynamisk kraftmätning

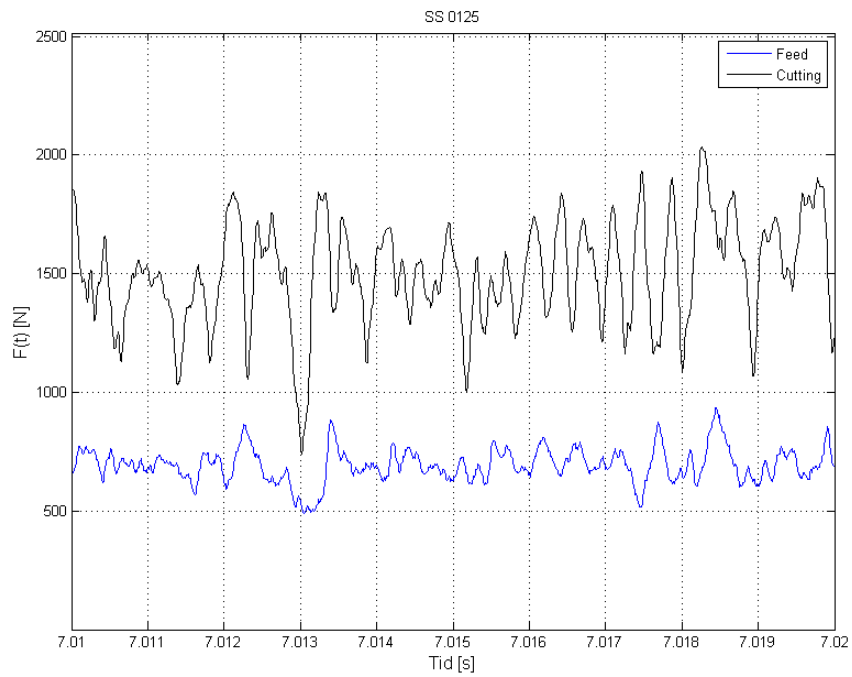
Material	a_p [mm]	v_c [m/s]	f [mm/rev]
SS 0125	3	150	0.5
SS 0727	3	150	0.5
SS 1672	3	150	0.5
SS 2244	3	150	0.5
SS 2348	3	150	0.5
Inconel718	2	30	0.1, 0.2, 0.3

I Inconel 718 gjordes försök med tre olika matningar för att studera hur dynamiken beror på spåntjockleken.

Segmenteringsfrekvensen beräknades genom att använda Matlabs inbyggda kommando `fft`; fast fourier transform. Eftersom `fft` ger oss frekvens representationen av signalen, absolutvärdet av fouriertransformen representerar hur mycket en specifik frekvens förekommer i signalen, max värdet är således vår mest förekommande frekvens, Figur 51. Förekommande frekvenser SS 0125,

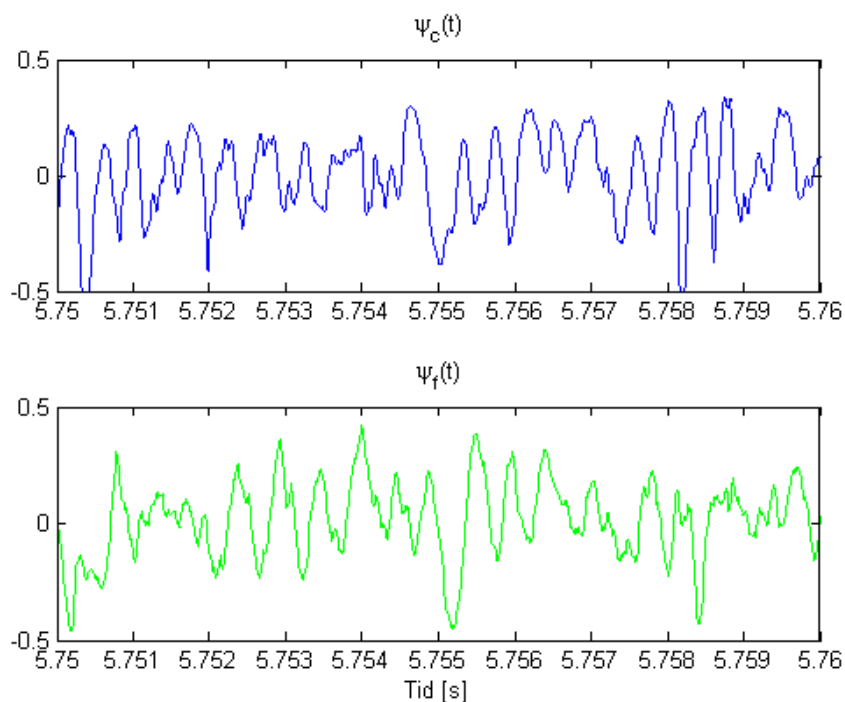


Figur 51. Förekommande frekvenser SS 0125



Figur 52 Dynamiska Skärkrafter SS0125

I Figur 52 Dynamiska Skärkrafter SS0125 ser vi skärkraften och matningskraften beroende av tiden under en hundraedels sekund.



Figur 53 Variationsfaktorer SS0125

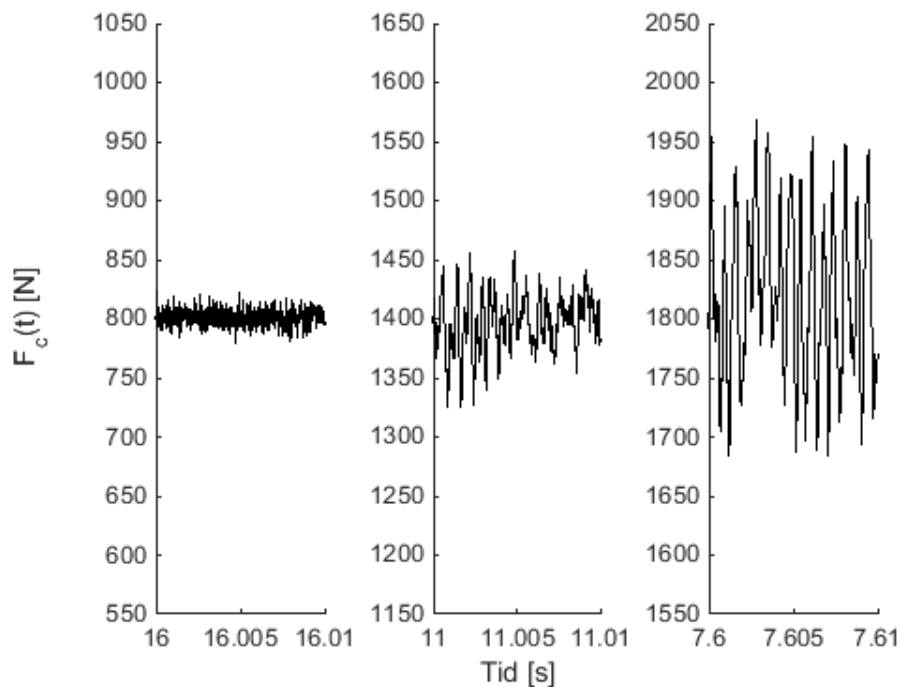
I Figur 53 presenteras variationsfaktorer i huvudskärriktningen och matningsriktningen i SS 0125. Diagram över variationsfaktorerna i de andra materialen presenteras i Appendix F Dynamiska Skärkrafter.

Tabell 37 Segmenteringsfrekvens och variationsfaktorer

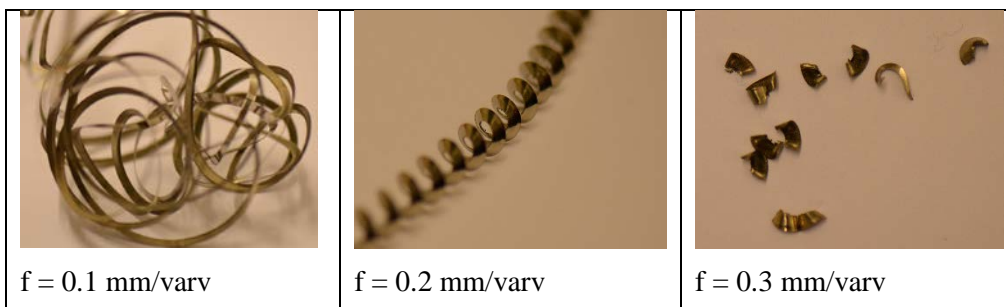
Material	f_s [Hz]	$\psi_c(t)_{max}$	$\psi_c(t)_{min}$
SS 0125	2578	0.39	-0.77
SS 0727	2726	0.44	-1.1
SS 1672	1720	0.07	-0.13
SS 2244	1886	0.08	-0.16
SS 2348	1750	0.13	-0.22
Inconel718 f=0.1	-	0.04	-0.04
Inconel718 f=0.2	-	0.08	-0.1
Inconel718 f=0.3	1456	0.12	-0.2

Man kan notera en väldigt låg segmentering i SS 1672 det vill säga det tar lång tid för segment att bildas och segmenten således blir stora. I försöken med Inconel inses att med de två lägre matningarna så erhålls ingen segmentering.

I Figur 55 visas spånor från de tre olika matningarna, väsentliga skillnader mellan alla matningarna, vid den lägsta matning 0.1 mm/varv har vi ingen segmentering, spånorna får formen av ett trassel som kan ställa till med besvär under bearbetningen. Vid 0.2 mm/varv har vi fortfarande ingen segmentering men spånan styvare och kan ledas bort ifrån processen under relativt kontrollerade former. Vid 0.3 mm/varv är segmenteringen utvecklad och spånan bryts i mindre bitar och är idealisk. Variationsfaktorn för de tre olika matningarna tydliggörs i Figur 54 $F_c(t)$ för tre (0.1, 0.2 och 0.3) matningar under 10 millisekunder där $F_c(t)$ är plottat för de tre olika matningarna.



Figur 54 $F_c(t)$ för tre (0.1, 0.2 och 0.3) matningar under 10 millisekunder



Figur 55 Spånor i Inconel 718 vid tre olika matningar

3.4 Jämförelse mellan Cr_1 och modellerade Cr_1

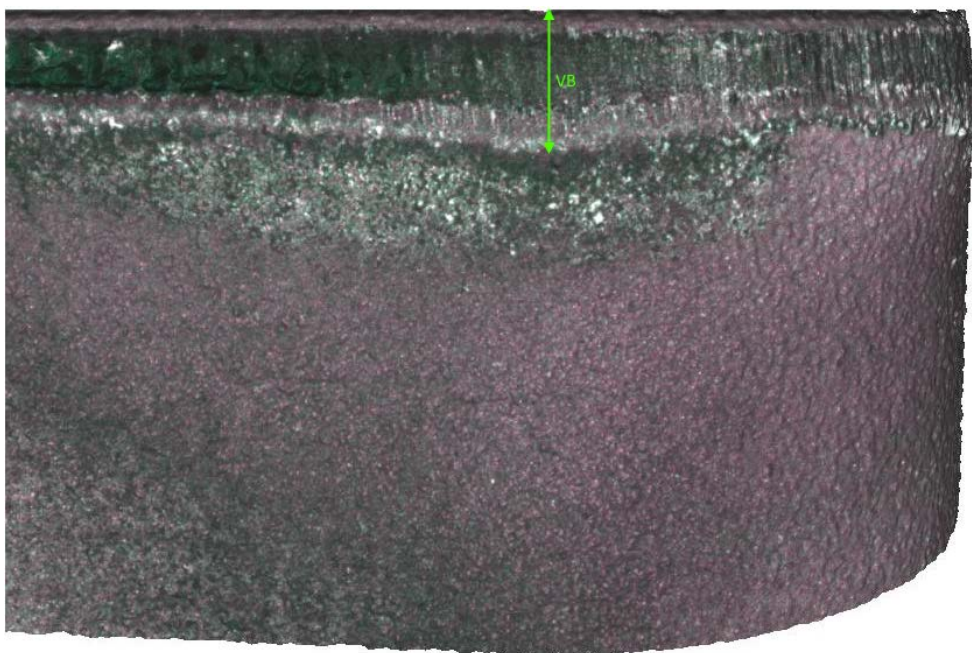
För att utvärdera modellen presenterad av Schultheiss et. al så beräknades modellerade Cr_1 värden enligt modellen och jämfördes med Cr_1 från statiska skärkraftsförsöken. Materialdatan som användes är den presenterad i 3.1 Arbetsmaterial.

Mtrl	Mtrl. grupp	Cr_1 [N/mm ²]	Cr_{1_modell} [N/mm ²]	Fel [%]
SS 1672	P	1734	1365	21.24
SS 2541	P	1835	1682	6.12
SS 2244	P	1876	1590	15.2
SS 2258	P	1941	1490	23.2
SAF 2507	M	2065	1836	11.07
SAF 2205	M	1920	1776	7.49
LDX 2101	M	1742	1686	3.2
SS 2348	M	1736	1620	6.65
Inconel 718	S	2280	2453	7.6
Titan 6-4	S	1467	2062	40.5
CW614N	N	656	638	2.6
CW724R	N	825	827	0.34

Figur 56 Resultat Schultheiss modell för Cr_1

3.5 Verktygsförslitning

Försök genomfördes för att ta fram konstanter till Coldings ekvation i ett material SS 2541. Verktygsförslitning studerades i arbetsmaterialet SS 2541, fem punkter togs fram med förslitningskriterium $VB = 0.3\text{mm}$:



Figur 57 Flankförslitning VB

Tabell 38 Verktygsnivslängd försök

Försök	Tid [min]	vc [m/min]	ap [mm]	f [mm/varv]	Vb
1	21.3	220	3	0.5	0.3
2	2.2	300	3	0.5	0.3
3	8.6	300	3	0.25	0.3
4	3.96	350	3	0.25	0.3
5	2.9	350	3	0.5	0.3

Åter igen användes minsta kvadratmetoden för att bestämma konstanterna till Ekvation 36:

$$v_c = e^{\left[K - \frac{(\ln(h_e) - H)^2}{4 \cdot M} - (N_0 - L \cdot \ln(h_e) \cdot \ln(T)) \right]} \quad \text{Ekvation 36}$$

Konstanterna som gav minsta modellfel presenteras i Tabell 39:

Tabell 39 Beräknade konstanter till Coldings ekvation

K	H	M	N0	L
6.18	- 1.7	1.7	0.314	- 0.08

Felen mellan modell och experimentella värden:

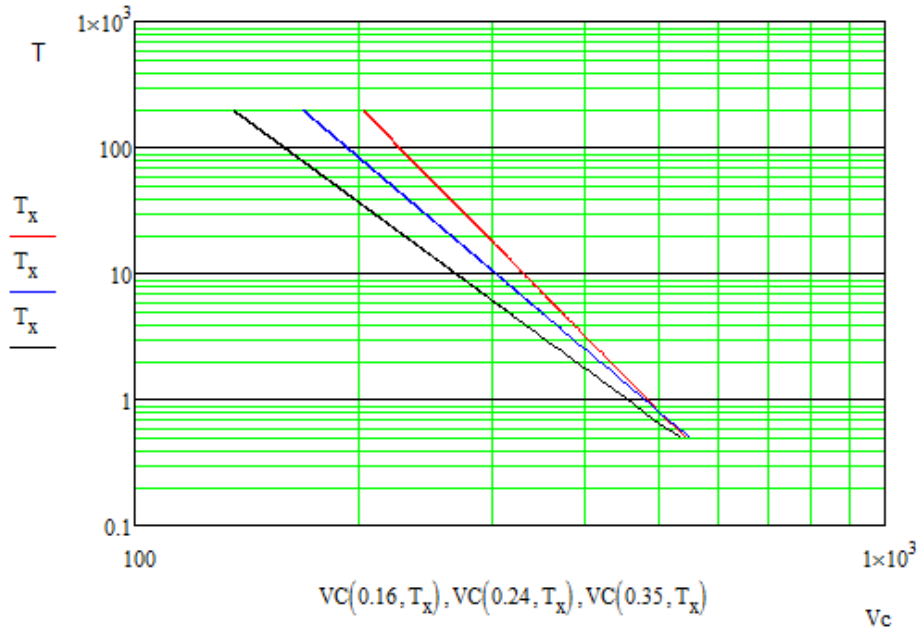
$$\epsilon_{\text{err}} = \frac{100}{n} \cdot \sum_{j=1}^{j=n} \left| \frac{v_{\text{cexpj}} - v_{\text{c,modj}}}{v_{\text{cexpj}}} \right| = 1.3 \% \quad \text{Ekvation 37}$$

Tabell 40 Fel i enskilda punkter

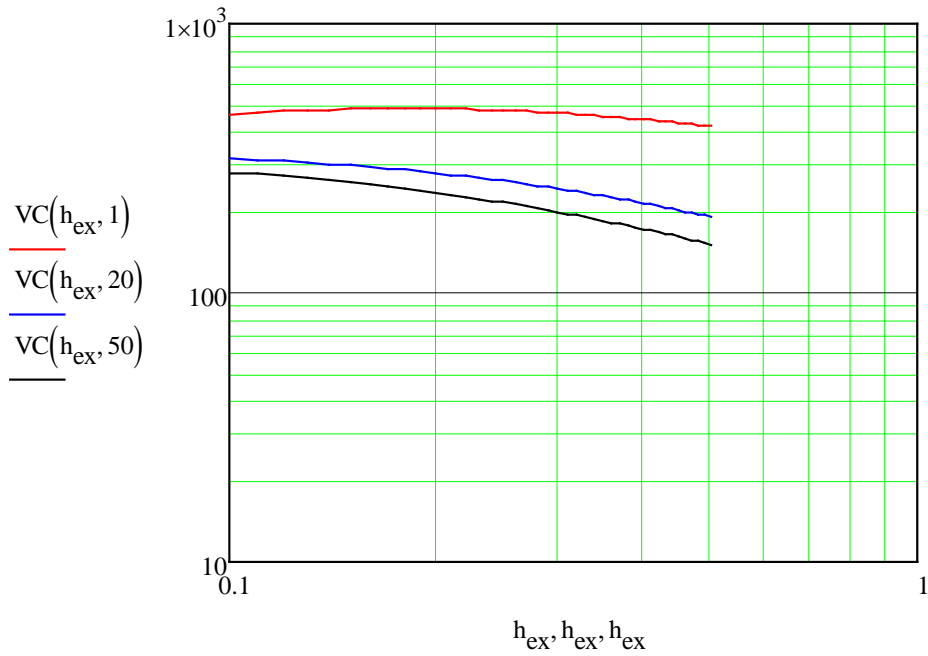
Försök	1	2	3	4	5
ϵ_{err} [%]	0.9	- 2.6	- 0.6	0	1.7

I Figur 58 visas resultatet i taylorplanet. Tolkningen är den att för ett givet v_c går man ut och möter rätt kurva för att ta ut livslängden för den skärhastigheten och spåntjocklek, eller tvärtom; för given tid tar man ut vilken skärhastighet man kan använda.

I Figur 59 visas samma resultat i coldingplanet för livslängder 1, 20 och 50 minuter.



Figur 58 Taylorplanet med $h_e = 0.16, 0.24$ och 0.35



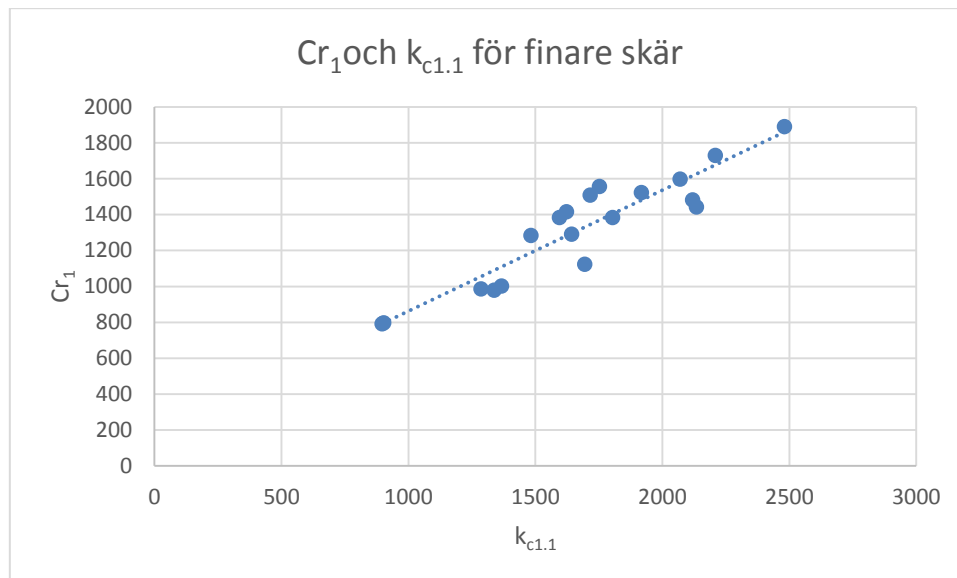
Figur 59 Coldingplanet med livslängder 1, 20 och 50 minuter.

4 SLUTSATSER

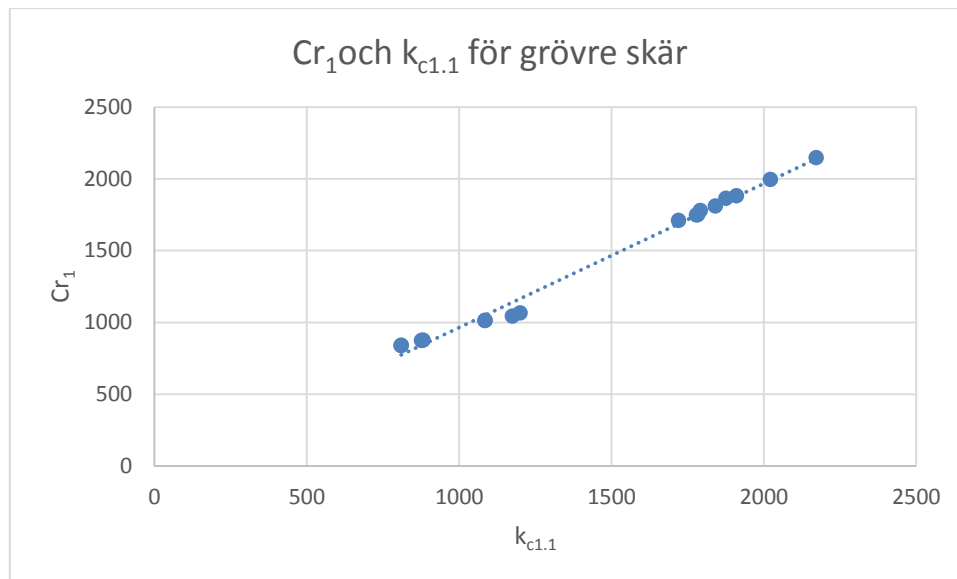
Kapitlet ämnar dra slutsatser från resultaten i föregående kapitel.

4.1 Skärmotstånd eller specifik skärkraft

De två modellerna för skärmotstånd och specifik skärkraft, beskriver båda skärkraften per spånarea, det vill säga ett tryck. Konstanterna i respektive modell Cr_1 och $k_{c1.1}$ har ett linjärt förhållande till varandra framförallt vid grövre skär.



Figur 60 Förhållande Cr_1 och $k_{c1.1}$ för finare skär

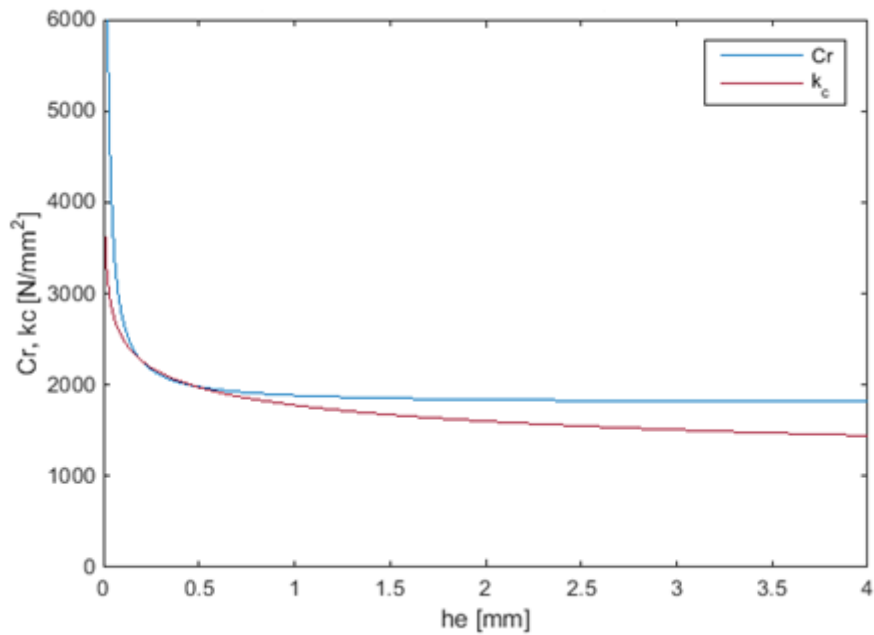


Figur 61 Förhållande Cr_1 och $k_{c1.1}$ för grövre skär

Det finns fundamentala skillnader i de båda modellerna när man undersöker beteendet vid väldigt små och stora spåntjocklekar. Med skärmotståndskonstanter (Tabell 41) från försök i SS 1672 med grövsta skäret så betar sig Cr och k_c när man extrapolerar h_e som Figur 62.

Tabell 41 Skärmotståndskonstanter SS1672 med skär verktyg 6

SS 1672	Cr_1	Cr_2	$k_{c1.1}$	m_c
Verktyg 6	1791	94	1778	0.15



Figur 62 C_r och k_c för extrapolerat h_e med verktyg 6

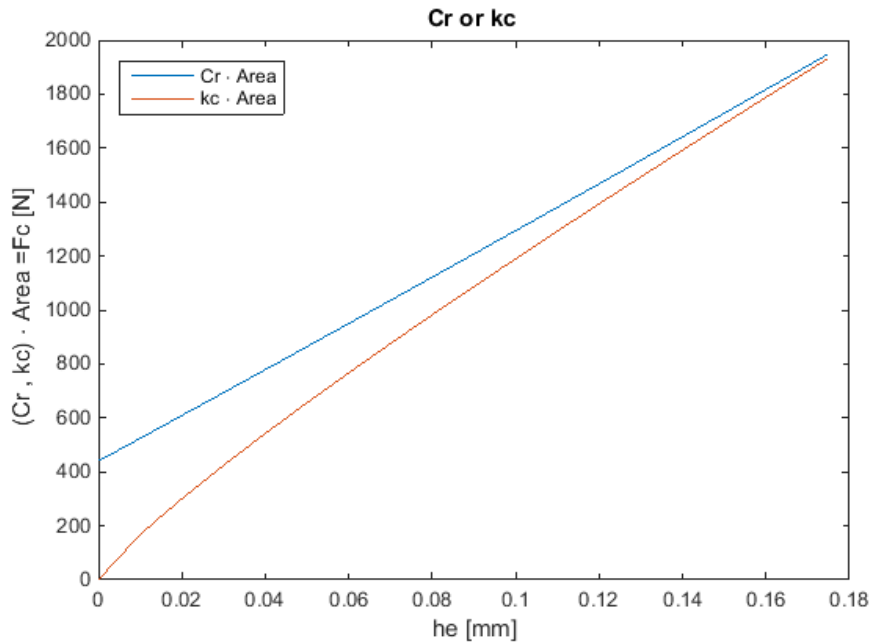
Man kan notera att de båda modellerna är fullt jämförbara i normalt operationsområde men vid högre skärdata så kommer k_c bli betydligt lägre. Studerar man modellernas fundamentala beteende inses att:

$$k_c = k_{c1.1} \cdot h_e^{-m_c} \rightarrow 0 \text{ då } h_e \rightarrow \infty$$

$$C_r = C_{r1} + \frac{C_{r2}}{h_e} \rightarrow C_{r1} \text{ då } h_e \rightarrow \infty$$

Ekvation 38

Vidare kan det konstateras att vid $h_e = 1$ så saknar konstanten m_c betydelse det vill säga rent praktiskt så försvinner betydelsen av skärets geometri och andra faktorer som kan anses påverka den.



Figur 63 C_r och k_c för små h_e

När man undersöker vad som händer när spåntjockleken blir väldigt liten:

$$F_c = C_r \cdot h_e \cdot l_b = \left(C_{r1} + \frac{C_{r2}}{h_e} \right) h_e \cdot l_b = C_2 \quad , \quad h_e \rightarrow 0 \quad \text{Ekvation 39}$$

$$k_c \cdot h_e \cdot l_b = k_{c1.1} \cdot h_e^{-mc} \cdot h_e \cdot l_b = 0 \quad , \quad h_e \rightarrow 0$$

Observeras att C_r modellen går mot C_2 det vill säga det krävs en viss kraft för att börja bilda en spåna, det innebär bland annat att vi faktiskt kan ploga material vid tillräckligt små spåntjocklekar utan att bilda spåna. Det beteendet saknas i Kienzles modell som går igenom origo.

4.2 Statiska Skärkrafter

I detta kapitel dras slutsatser ifrån resultaten i föregående kapitel om de materialen som behandlats i experimentella studier. I Tabell 42 rangordnas materialen efter Cr_1 . Eftersom materialegenskaper ska ha högs inverkan på Cr_1 så utvärderas skärbarheten hos ett material efter den parametern. Cr_1 och $k_{c1.1}$ har som visats ett linjärt förhållande så rangordning bör gälla även för $k_{c1.1}$ det gäller dock inte fullt ut i nedanstående tabell. Vi har valt att dra slutsatser uppdelat i material grupper från hög skärbarhet (låg Cr_1) till låg skärbarhet (hög Cr_1).

Tabell 42 Arbetsmaterial sorterat efter Cr_1

mtrl grupp	SS	DIN	Cr_1	Cr_2
N11	5170	CW614N	656	32
N11		CW724R	825	47
K1	0125	EN-GJL-250	872	87
K4	0727	EN-GJS-500-7	1244	113
S12	TiAl6V4		1467	70
P4	1672	C 45E	1734	74
M3	2348	X2 CrNiMo 17 13 2	1736	75
M4	LDX 2101		1742	78
P3	V-2158-60	16 MnCr 5	1760	76
P8	2541	34 CrNiMo 6	1835	75
P5	2244	42 CrMo 4	1876	75
M4	SAF2205	X2CrNiMoN 22 5 3	1920	69
P7	2258	100 Cr 6	1941	69
P2	1312	ST 37-3	1972	66
M5	SAF2507	X2CrNiMoN 25 7 4	2065	59
S3	Inconel 718		2280	113

4.2.1 MATERIALGRUPP N

I material grupp N finner vi blyad och oblyad mässing. Båda visar lågt skärmotstånd. Kraftbilden för båda materialen är låg, vi kan konstatera att mässingen med bly får lägre Cr_1 än Ecobrass som förväntat, då bly tillsätts för att öka skärbarheten. Då krafterna inte är särskilt höga i någon av mässings typerna kan man anta att bly framför allt bidrar med en bättre spånbrutning något vi inte studerade i försöken med mässing.

Man kan notera att det är CW614N som är referensmaterial i subgruppen N11 och applicerar man konstanterna ifrån CW614N på CW724R så blir modellfelet högt (~25%).

4.2.2 MATERIALGRUPP K

Gjutjärnen i materialgrupp K har en något lägre skärbarhet än i grupp N. Vid försöken uppmärksammas att båda gjutjärnen är kortspånande. Vi gjorde försöken utan skärvätska för att efterlikna faktiska situationer i industrin där man oftast bearbetar gjutjärn utan skärvätska. Gråjärnet med lammelär grafit (SS 0125) utvecklade lägre skärkraft än segjärnet med sfäriska grafiten (SS 0727) vilket var förväntat då segjärn har en betydligt högre hållfasthet. Materialen i K-guppen visar en stor spridning i Cr_1 värden 872 till 1244.

4.2.3 MATERIALGRUPP P

Det visar sig att SS 1672 erhåller det lägsta skärmotståndet inbördes för arbetsmaterialen i materialgrupp P, detta förstås genom att studera materialets egenskaper. Hårdhet är avsevärt mycket lägre än motsvarande för SS 2244 och SS 2541. Sträck- och brottgränsen är ungefär hälften jämfört med SS 2244 och SS 2541. Den anlöpta martensiten i SS 2541 erhåller i stort sett samma skärmotstånd som SS 2244, vars mikrostruktur är ferrit/perlit.

Det visar sig att trots den mjuka ferritiska materialstrukturen i SS 1312, så erhåller den högst värde vad gäller skärmotstånd, anledningen till detta är arbetsmaterialets benägenhet att kleta och vidhäfta på skärverktyget. Detta har med högsta sannolikhet uppstått eftersom försök har utförts med för låg skärhastighet och för låga matningar.

4.2.4 MATERIALGRUPP M

SS 2348 är ett austenitiskt krom-nickelstål som legerats för att förbättra skärbarheten. De övriga stålen tillhör de duplexa rostfria stålen, där samtliga är austenitisk-ferritiska, vilka i enlighet med teorin har en sämre skärbarhet än de rent austenitiskt rostfria stålen.

4.2.5 MATERIALGRUPP S

Materialgrupp S är lite speciell då den innehåller både Titan 6-4 samt Inconel 718 vilka ligger på motsatt sida av tabellen över Cr_1 .

4.2.5.1 Titan 6-4

Titan 6-4 ligger bara över gjutjärn och mässing i Cr_1 värde. Det vill säga att studeras bara kraftaspekten av skärbarhet så är det bara gjutjärn och mässing som har en högre skärbarhet. Då värmebildning och adhesion blir mer påtagligt med längre bearbetningstider så noterades inga större problem på grund av de faktorerna under våra relativt korta försök med matningstrappor.

4.2.5.2 Inconel 718

Inconel däremot visade sig vara det material som gav oss högst Cr_1 även om försöken utfördes med relativt passiva skärdata med skärhastighet på 30 m/s dock så noterades att matningen behövdes hållas rätt så hög då det annars finns risk för att svarva i deformationshärdat material just på grund av materialets benägenhet att just deformationshärda. I Inconel märktes också att även under ingreppstid på 25 sekunder att skäret kom upp i rätt så hög temperatur.

4.2.6 Cr_1 OCH K_{c11} FÖR ALLA SKÄR I ETT MATERIAL

Cr_1 och k_{c11} beräknades för alla skär i ett material med resultatet att felen hamnar mellan 1-10% i enskilda fall upp till 15 % fel. Jämfört med när konstanter beräknades för varje skärsort så är modellfelen relativt höga, men de grövre skären håller ett modellfel <8,5 % vilket genom diskussion med personal ifrån Seco Tools konstaterats som fullt tillräckligt för tillämpning i industrin. Skärkraften används som sagt för energiåtgång, moment och dimensionering av fixturer osv. Det blir endast signifikant att beräkna för grövre skär där krafterna är högre så vi anser att generaliseringen av konstanter är godtagbar. Konstanter för Cr modellen presenteras i Tabell 27 och för Kienzle modellen i Tabell 29 på sida 58. Vidare så när Cr_2 och m_c hålls konstant inom materialgrupperna så ökar modellfelen något så en bedömning får göras om förenklingen är värd den om än låga ökning i modellfel.

4.3 Dynamiska Krafter

Dynamiska skärkrafter mättes i fem material två i P-gruppen, två i K-gruppen samt Inconel i S-gruppen.

De material i P gruppen där dynamiska skärkraftstester utfördes var SS 1672 och SS 2244. SS 2244 hade en segmenteringsfrekvens på 1886 Hz samtidigt som SS 1672 visade nära noll segmentering vid vald skärdata. SS 2244 har en betydligt högre sträckgräns och draghållfasthet jämfört med SS 1672 dock en betydligt lägre duktilitet vilket bidrar till att spånan segmenteras.

I materialgrupp K påvisade materialen en hög segmenteringsfrekvens och höga variationsfaktorer, högst i de materialen som testades. Hög variations faktor tyder på att spånan som produceras är av diskontinuerlig typ vilket även stämmer överens med våra observationer. En hög segmenteringsfrekvens innebär att segmenten som bildas är tunna vilket passar väl ihop med hur sprött materialen beter sig under bearbetning.

I Inconel 718 genomfördes försök med varierande matning. Vid de lägre matningarna så fick vi nära noll segmenteringsfrekvens och spånor som var kontinuerliga, vid den högsta matningen 0.3 mm/rev så fick vi segmentering och en segmenteringsfrekvens på 1456 Hz, och en diskontinuerlig spåna.

4.4 Cr₁ som funktion av material parametrar

Då tabulerade värden till en stor del användes som indata i Schultheiss modell så anser vi att den överlag stämmer rätt så bra överens med experimentell data, men att det antagligen finns förbättringspotential. Resultaten är presenterade på sida 72.

De mest anmärkningsvärda resultaten är de för Titan med 40 % fel mot experimentella värden men med avseende på att titan och Inconel ligger i samma materialgrupp och således får samma konstanter så är det inte så konstigt, då de deras Cr₁ värden ligger långt ifrån varandra. I övrigt så passar modellen något sämre för p-gruppen uppemot 23 % fel för en del material, tvärtemot Schultheiss resultat.

Då tabulerade värden ofta har ett brett spann anpassades resterande parametrar mot experimentella hårdhetstester och fick något bättre resultat. För att utvärdera modellen helt anser vi att material parametrar bör testas för specifik leverantör kanske även batch, men om inte leverantören kan leverera sådana data så faller modellens betydelse något.

4.5 Colding's Verktöglivslängd

De slutsatser man kan dra av livslängdstesterna beskrivs i Taylorplanet i Figur 58 samt Coldingplanet i Figur 59. Studerar man Coldingplanet märker man att för att erhålla en längre skärhastighet för samma ekvivalenta spåntjocklek (h_c) krävs att skärhastigheten (v_c) minskas, vilket ter sig tämligen naturligt.

Det noterades också att förslitningen för respektive skär kunde delas in i två faser. En fas vid inledningen av försöken, där förslitningshastigheten var tämligen hög. En fasförslitning på mellan 0.15 till 0.2 erhöles tämligen snabbt. Därefter när skäret var inkört, stabiliserades förslitningshastigheten och ökningen i verktygsförslitningen per tidsenhet blev inte lika markant som tidigare. Dessa faser var speciellt tydliga vid förslitningstesterna med de lägre matningarna.

Man kan tänka sig att även en tredje fas skulle kunna existera, där fasförslitningshastigheten återigen ökar markant som ett resultat av själva förslitningen. Den tredje fasan noterades dock inte under experimenten, sannolikt därför att för få mätningar gjordes över tid.

Det bör också noteras att försök nummer 2 erhåller en kortare livslängd jämfört med försök nummer 5, trots att skärhastigheten minskats med bibehållen matning enligt tabell 32.

Detta kan ha sin förklaring i att skärverktyget i försök nummer 2 kan ha haft en annan eggradie, samt sämre beläggning från tillverkning, än vad skärverktyget i försök nummer 5 hade. Detta beror på att skärverktygen från fabrik endast har vissa toleranser, vilka de ska ligga innanför.

Utöver dessa förklaringar kan man också tänka sig att arbetsmaterialet inte är helt homogent, utan att verktyget träffats av ett antal hårda partiklar, från just arbetsmaterialet i försök nummer 2, vilket inte skedde i försök nummer 5.

Det bör dock tilläggas att när man talar om verktygets livslängd på 2.2 minuter och 2.9 minuter så skiljer det sig endast 42 sekunder. Med tanke på det nämnda om tillverkarnas toleranser samt avvikelser i arbetsmaterialet kommer det alltid vara svårt att bedöma skärbarhet på sekundbasis.

5 KOMMENTARER

I våra statiska kraftmätningar så valde vi att försöka hålla samma matningstrappor och övrig skärdata samma för samtliga material inom en materialgrupp, det innebar att en del material kördes med suboptimal skärdata vilket innebar att en del fenomen som påkletning förekom som kanske hade kunnat undvikas med ett mer genomtänkt skärdata val, dock på bekostnad av jämförbarhet mellan försök.

I de dynamiska kraftmätningarna visade sig kraftgivaren vara felkalibrerad, den var kalibrerad för 5V matningsspänning. Vi utförde försöken med 10V. Vi korrigerade dynamiska krafter för detta misstag och anser att eftersom vi väljer att inte studera de dynamiska krafternas belopp utan endas dess variation att misstaget tappar betydelse.

6 FÖRSLAG PÅ VIDARE STUDIER

Vidare studier som vi anser intressanta och lämpliga är en fortsatt utveckling av en modell som beräknar Cr_1 som funktion på materialegenskaper. För att komplettera denna modell så bör även en modell för att approximera Cr_2 beroende på process och skärgeometri studeras och se om det är möjligt att formulera en sådan. Författarna har gjort vissa ansatser på sistnämnda utan framgång.

För fortsatt kartläggning av skärbarheten så bör dynamiska kraftmätningar utföras på fler material men även verktygslivslängds försök.

Vidare hade det varit intressant att i förslitningstesterna undersöka en provserie där matningen och skärhastigheten för den punkt med lägst matning och skärhastighet ökar lika mycket i förhållande till varandra som i den punkt med den största matningen och skärhastigheten. D v s om matningen i en punkt ökar med 100 % så ökas även skärhastigheten med 100%, med syfte att ta reda på i hur stor utsträckning matningen respektive skärhastigheten påverkar livslängden av skärverktyget.

7 REFERENSER

- [1] Seco Tools AB, "Secos historia," Seco Tools AB, 2015. [Online]. Available: <http://www.secotools.com/sv/Global/Om-Seco/Historia/>. [Använd 08 02 2015].
- [2] J.-E. Ståhl, *Metal Cutting and Models*, Lund, Sweden, 2012.
- [3] R. Woxen, "Theory and an Equation for the Life of Lathe Tools," *Ingenjörsvetenskapsakademin*, 1932.
- [4] O. Svahn, "Machining Properties and Wear of Milling Cutters," Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm, 1948.
- [5] I. Johansson, "Metod för beräkning av skärkrafter, moment och effekter vid fräsning," Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 1967.
- [6] O. Kienzle, "Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen un Werkzeugmaschinen," *VDI-Z*, pp. 299-306, April 1952.
- [7] J.-E. Ståhl, "Skäreggars Spontanhaverier, PhD Thesis," Production and Materials Engineering, Lund University, Lund, Sweden, 1986.
- [8] G. Hök, "Om skärverktygens (svarf-ö och hyvelståls) rätta form," Verkstäderna, organ för Sveriges verkstadsförening, Stockholm, 1909.
- [9] K. Levenberg, "A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares," *Quarterly of Applied Mathematics*, vol. 2, pp. 164-168, 1944.
- [10] D. W. Marquardt, "An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters," *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 11, pp. 431-441, 1963.
- [11] G. Litak, Y. S. Polyakov, S. F. Timashev och R. Rusinek, "Dynamics of stainless steel turning: Analysis by flicker-noise spectroscopy," *Physics A*, vol. 60, pp. 52-63, 2013.
- [12] J. D. Thiele och S. N. Melkote, "Effect of Cutting Edge Geometry and Wokpiece Hardness on Surface Generation in the Finish Hard Turning of AISI 52100 Steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 94, pp. 216-226, 1999.
- [13] T. Özel, Y. Karpat och A. Srivaste, "Hard turning with variable micro-geometry PcBN tools," *CIRP Annal - Manufacturing Technology*, vol. 57, pp. 73-76, 2008.

- [14] *Verktygsmaterial*, Produktionsteknik LTH.
- [15] Sandvik Coromant, "Belagd hårdmetall," 2000. [Online]. Available: http://www.sandvik.coromant.com/sv-se/knowledge/materials/cutting_tool_materials/coated_cemented_carbide/pages/default.aspx. [Använd 02 12 2014].
- [16] Robustus AB, "www.robustus.se," [Online]. Available: <http://www.robustus.se/Portals/4/pdf/Om%20hardmetall.pdf>. [Använd 10 01 2015].
- [17] SECO, *Verktyskatalog*, Seco Tools, 2013.
- [18] T. Böllinghaus, "Handbook of Mechanical Engineering," i *Grote, Antonsson (Eds.)*, New York, Springer Science+Business Media, 2008, pp. 606-656.
- [19] D. Johansson, F. Schultheiss, V. Bushlya, J. Zhou och J.-E. Ståhl, "Tool Life and Wear Moden in Metal Cutting, Part 1 -Influence of Varying Flank Wear Criterion on Colding's Tool Life Equation," i *Proceedings of the 6th Swedish Production Symposium*, 2014.
- [20] F. W. Taylor, "On the Art of Cutting Metals," *The American Society of Mechanical Engineers*, 1906.
- [21] O. Boston, "Metal Processing," Wiley, New York, 1941.
- [22] B. Colding, "The Machining Productivity Mountain and its Wall of optimum Productivity," *9th NAMRAC*, pp. 37-42, 1981.
- [23] B. Colding, "A tool-temperature/tool-life relationship covering a wide range of cutting data," *CIRP Annals -Manufacturing Technology*, nr 40, pp. 35-40, 1991.
- [24] S. Hägglund, "Methods and Models for Cutting Data optimization, Doctoral Thesis," Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2013.
- [25] Sandvik Coromant, "Materialgrupper," Sandvik Coromant, [Online]. Available: http://www.sandvik.coromant.com/sv-se/knowledge/parting_grooving/how-to-achieve-good-component-quality/parting-and-grooving-in-different-materials/material-groups/Pages/default.aspx. [Använd 10 12 2014].
- [26] SECO, *SMG Version 2*, Fagersta: SECO, 2014.
- [27] D. M. Stefanescu, "Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Allys," i *ASM Handbook, Volume 1*, New York, ASM International, 2005, pp. 17-101.
- [28] D. C. J. William och G. R. David, *Fundamentals of Materials Science and Engineering - An Integratet Approach - third edition*, John Wiely & sons,

2008.

- [29] I. Johansson, Försök att bestämma bearbetningsindex vid skärande bearbetning då bearbetbarheten definieras med avseende på utslitningstid för verktyget, erhållen ytfinhet, spångodhet och skärkrafter, Stockholm: CTH, 1959.
- [30] F. Schultheiss, "On the Machinability of Ductil and Strain Hardening Materials," Division of Production and Materials Engineering , Lund, 2013.
- [31] Metals Park, "ASM source book in copper and copper alloys," i *ASM Handbook*, American Society for Metals, 1979.
- [32] R. N. Stoloff, "Specialty Steels and Heat-Resistant Alloys," i *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys*, New York, ASM, 2005, pp. 1478-1525.
- [33] Wieland, "The lead-free material," Wieland, [Online]. Available: https://www.wieland.de/internet/en/produkte/press_und_ziehbereich/produktkatalog_2/werkstoffe_liefer_lagerprogramm/trinkwasseranwendungen/cuphin/werkstoff/werkstoff.jsp. [Använd 22 02 2015].
- [34] AB Sandvik Coromant, Modern Skärande Bearbetning - en praktisk handbok, Sandviken, Sweden: Tofters tryckeri AB, 1994.
- [35] A. C. Fischer-Cripps, Nanoindentation, New York: Springer-Verlag, 2011, p. 282.
- [36] F. Schultheiss, V. Bushlya, J. Zhou och J.-E. Ståhl, "Influence of the Workpiece Material Properties on the Cutting Forces," i *Proceedings of the 6th Swedish Production Symposium*, 2014.
- [37] J.-E. Ståhl och M. Andersson, "Polar Diagram Machinability Diagram," i *Proceedings of the Swedish Production Symposium*, Gothenburg, Sweden, 2007.
- [38] A.-L. Cristol, D. Balloy, C. Nielaes, P. Quaegebeur och L. Neet, "Cracking of S235JR Cold-Deformed Steel during Galvanizing- Developing a Test to Evaluate and Predict the Effect of the Zinc Alloy Composition," *Surface Engineered Materials and Advanced Technology*, vol. 3, pp. 75-83, 2013.
- [39] lucefin, "material properties," [Online]. Available: <http://www.lucefim.com/>. [Använd 15 02 2015].
- [40] Ovako, "Ovako Steel Navigator," Ovako , [Online]. Available: http://www.ovako.com/steel_navigator/search/. [Använd 28 8 2014].
- [41] Sandvik, "materials center," Sandvik, [Online]. Available: <http://www.smt.sandvik.com/en-au/materials-center>. [Använd 15 2 2015].

- [42] Kihlbergs stål, "Specialstål - smide- gjutgods," [Online]. Available: <http://www.kihlsteel.se/Aemnesroer.html>. [Använd 12 2 2015].
- [43] Metal Suppliers online, "Material Property Data," Metal Suppliers Online, 2015. [Online]. Available: <http://www.suppliersonline.com/propertypages/6-4.asp>. [Använd 03 02 2015].
- [44] AALCO, "Copper Brassw Bronze CW614N," Aalco Metals Ltd, Surrey, 2015.
- [45] H. Berns, "Grey Cast Iron," MakeItFrom.com , [Online]. Available: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/ASTM-Grade-35-ISO-Grade-250-EN-JL-1040-Grey-Cast-Iron/>. [Använd 10 12 2014].
- [46] Kihlberg stål ab, "Gjutna ämnesrör," [Online]. Available: <http://www.kihlsteel.se/Aemnesroer.html>. [Använd 05 01 2015].
- [47] SolidConcepts, "solidconcepts material-specification," 2008. [Online]. Available: <https://www.solidconcepts.com/content/pdfs/material-specifications/dmls-titanium-ti-ti64.pdf>. [Använd 03 03 2015].

8 APPENDIX

8.1 Appendix A Materialegenskaper

Tabell 43 Materialegenskaper [45] [46] [40] [41] [47] [39]

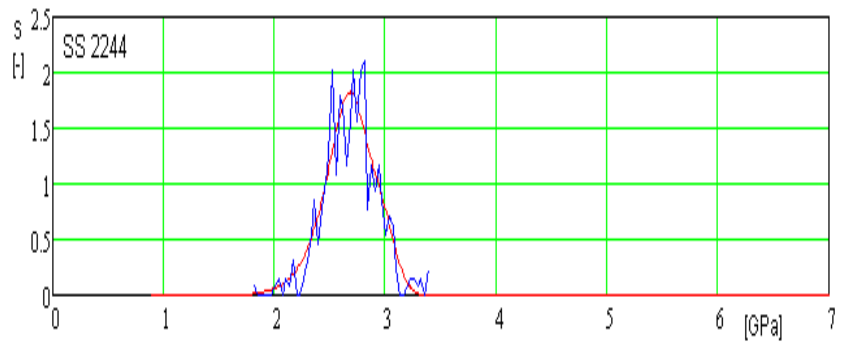
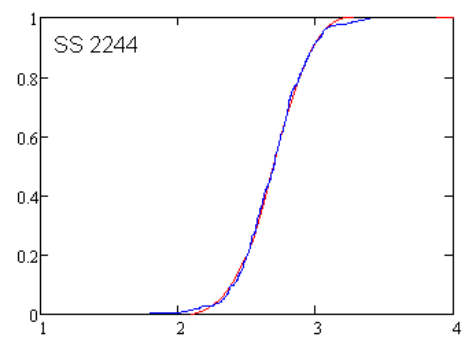
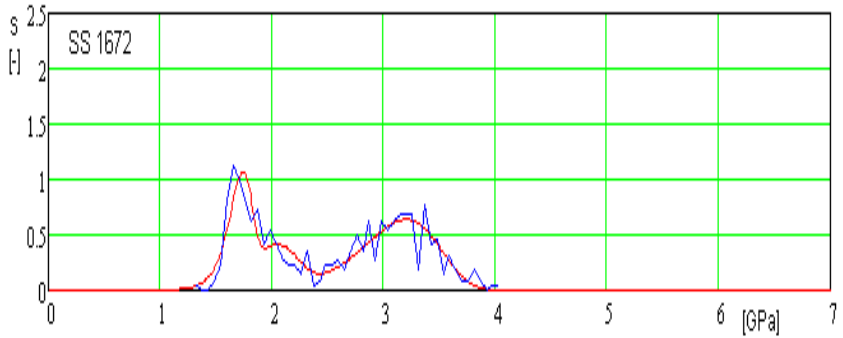
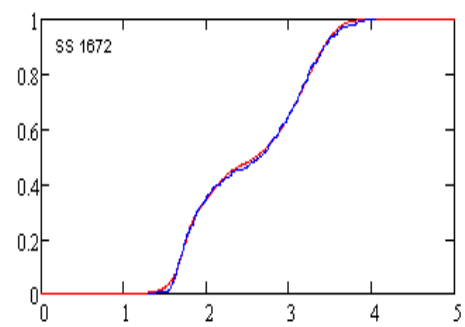
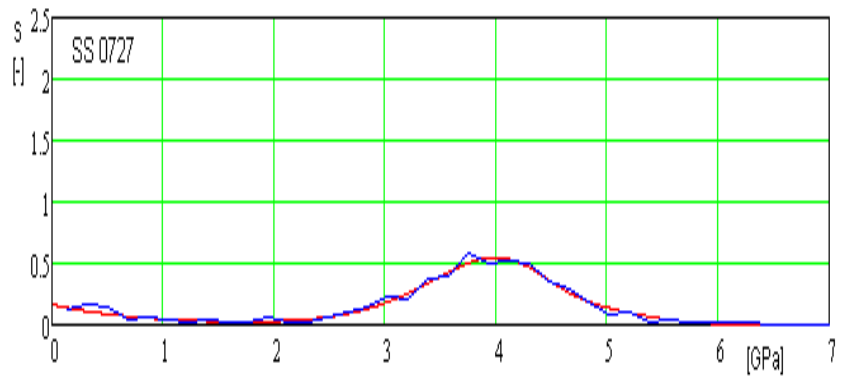
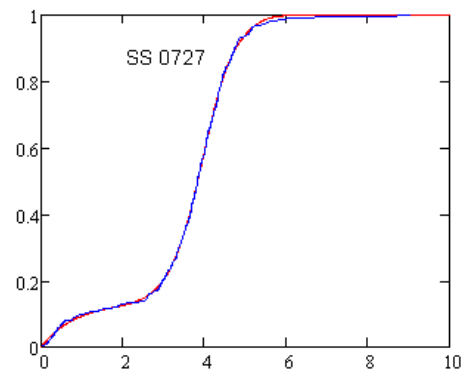
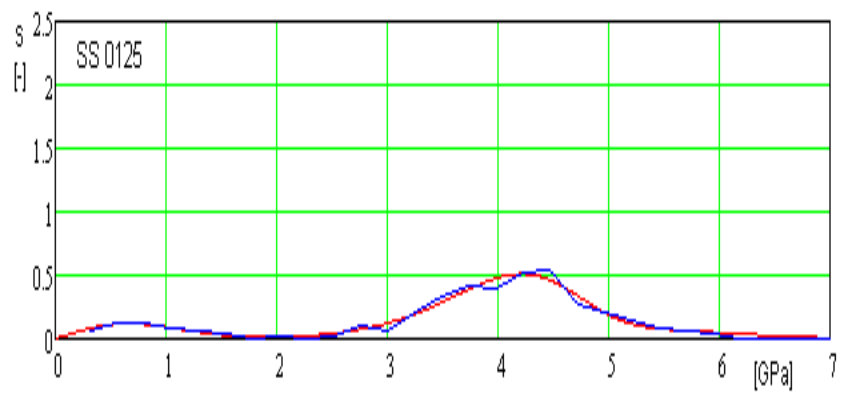
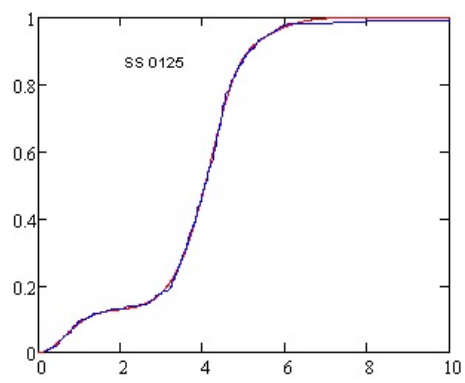
Material	Duktilitet [eb]	Termisk konduktivitet [K]	Hårdhet [HB]	Def.Hårdnande (Brottgräns/ Sträckgräns)	Abrasivitet (GPa)
SS 0125	1	46	217	350/211.5 (1.65)	9.25
SS 0727	7	35.2	200	500/320 (1.56)	8.82
SS1312	11	25	180	505/235 (2.15)	-
SS 1672	16	50	175	560/275 (2.04)	4.64
SS2244	12	34	230	1000/650 (1.54)	3.72
SS2258	13	45	210	880/700 (1.26)	4.84
SS2348	45	17	175	602.5/220 (2.74)	3.71
SS2541	12	38	302	1000/700 (1.43)	5.66
Inc 718	21	12.1	425	1407/1172 (1.20)	6.53
Titan 6-4	11	6.7	392	1150/1030 (1.12)	5.81
CuZn39Pb3	17.5	113	148	505/395 (1.28)	3.25
CuZn21Si3P	15	35	160	600/300 (2.00)	4.35
LDX 2101	38	17	230	696/478 (1.46)	6.67
SAF 2205	25	17	270	760/450 (1.69)	6.67
SAF 2507	25	16	310	900/550 (1.64)	6.67

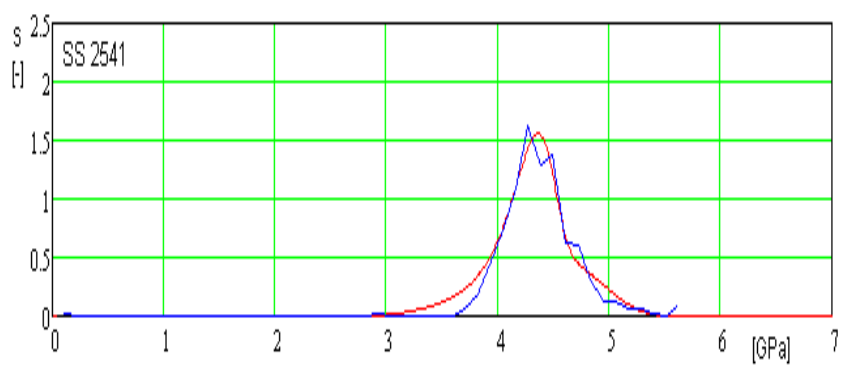
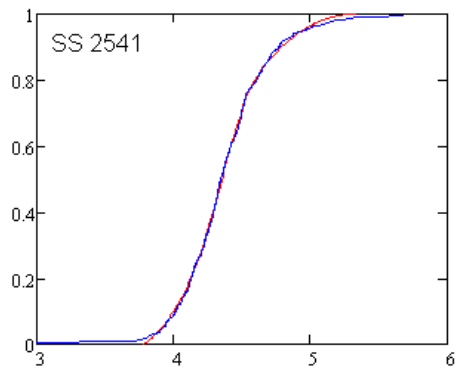
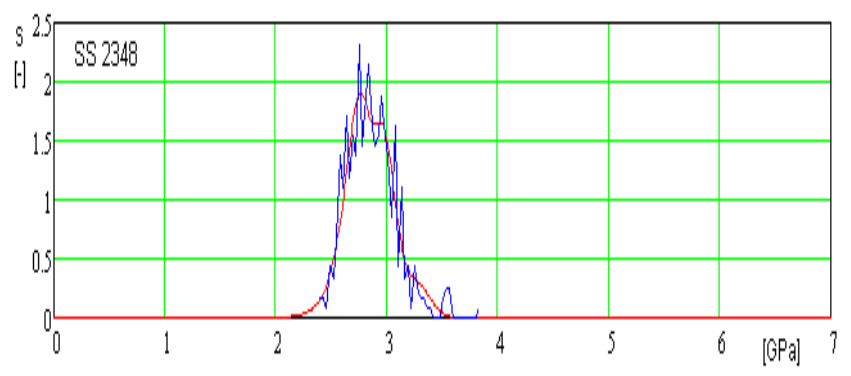
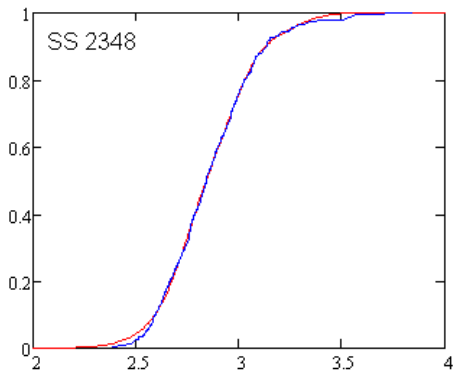
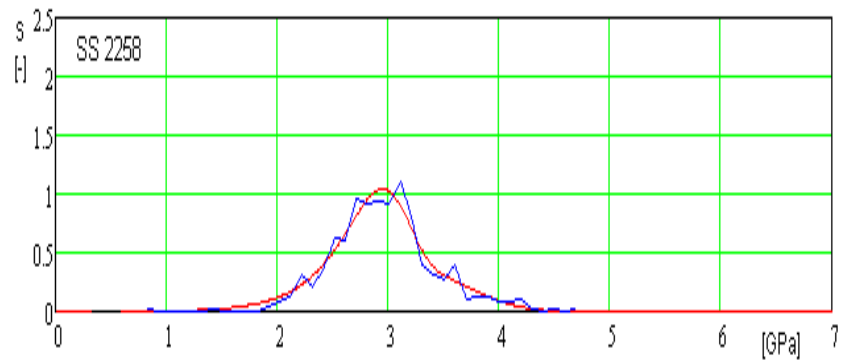
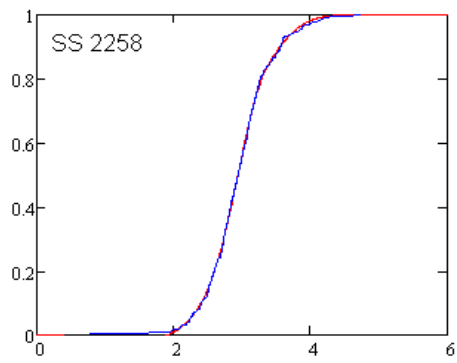
8.2 Appendix B Abrasivitet

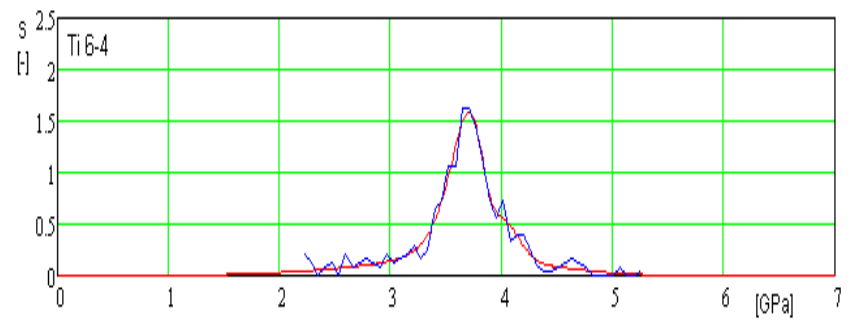
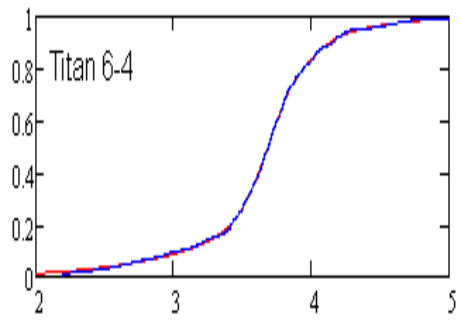
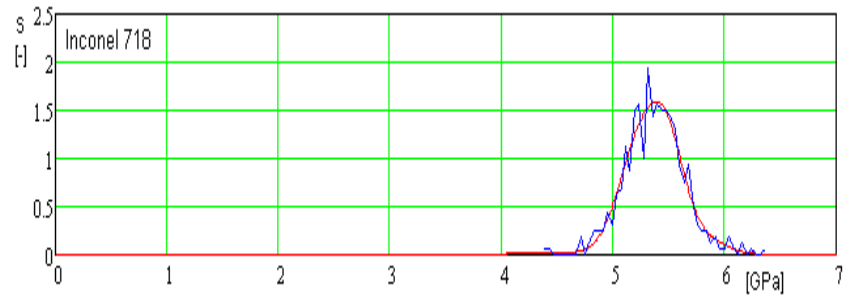
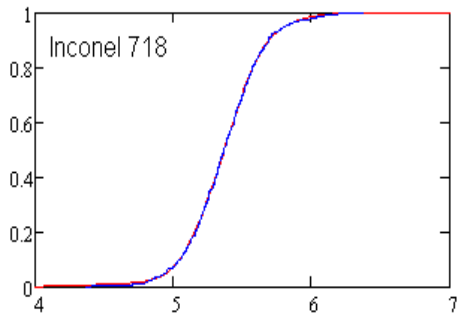
$$F_w = (1 - \chi - \psi) \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \right] + \chi \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\delta}\right)^\gamma} \right] + \psi \left[1 - e^{-\left(\frac{x}{\eta}\right)^\varepsilon} \right]$$

Tabell 44. Ingående parametrar fördelningsfunktioner

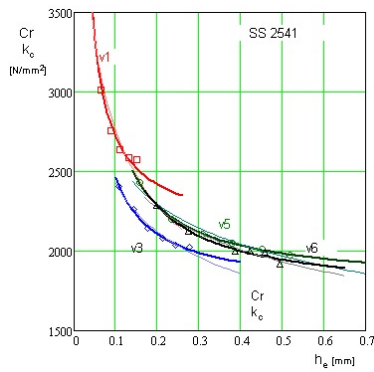
Material	β	δ	η	α	γ	ε	Fel [%]
SS 0125	0.91	5.21	4.26	2.05	5.12	7.85	0.66
SS 0727	0.81	3.99	4.47	1.0	8.5	5.95	0.47
SS1672	1.74	2.05	3.24	18.58	9.81	9.96	0.74
SS 2244	1.59	2.64	2.83	1.03	19.1	12.84	0.77
SS 2258	0.5	2.96	3.25	10.0	11.44	5,89	0.64
SS 2348	2.94	2.73	3.21	21.58	27.9	17.27	0.66
SS 2541	2.49	4.53	4.36	1.48	10.07	25.27	0.83
Inconel 718	5.55	5.39	4.88	14.95	23.05	26.41	0.39
TiAl6V4	3.82	3.70	3.96	5.06	27.53	18.63	0.45



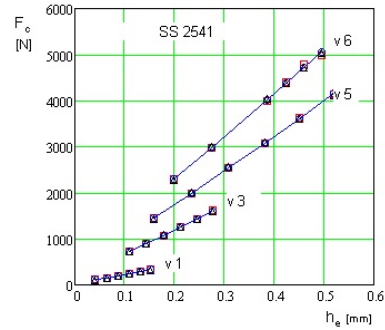




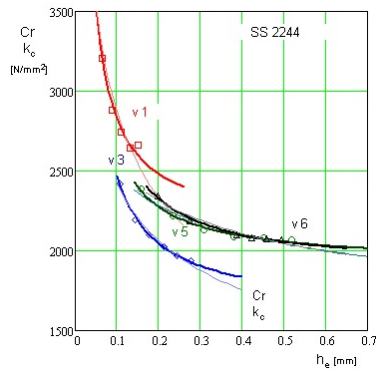
8.3 Appendix C Statiska Skärkrafter Diagram



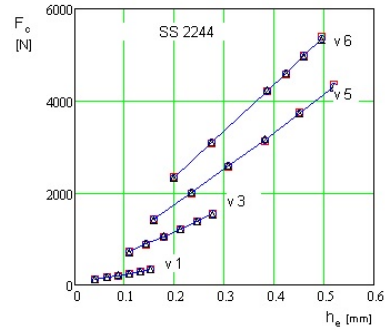
Figur 64. C_r och k_c som funktion av h_e SS 2541



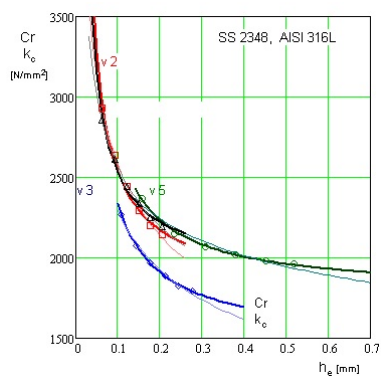
Figur 65. F_c mätta och modellerade värden SS 2541



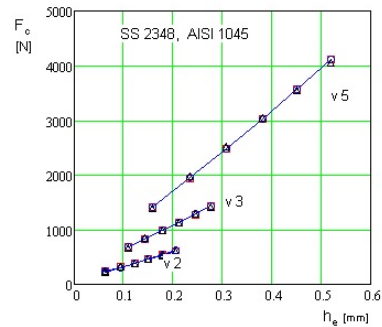
Figur 66. C_r och k_c som funktion av h_e SS 2244



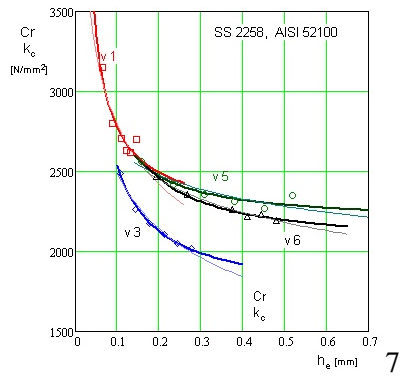
Figur 67. F_c mätta och modellerade värden SS 2244



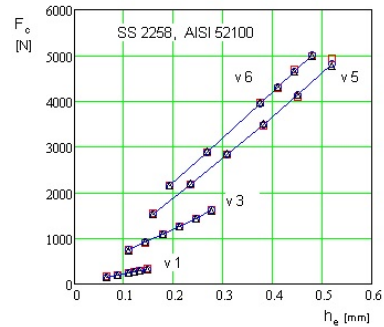
Figur 68. C_r och k_c som funktion av h_e SS 2348



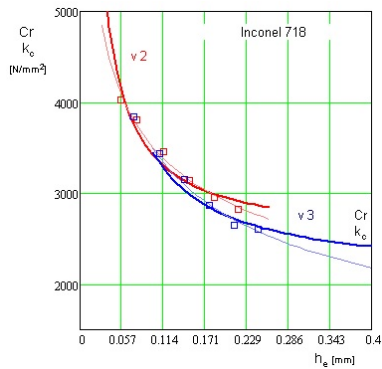
Figur 69. F_c mätta och modellerade värden SS 2348



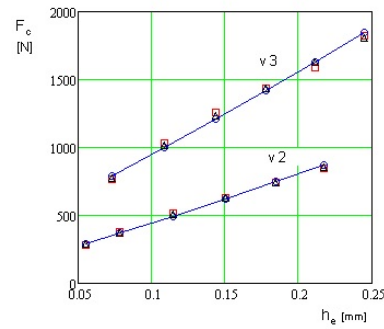
Figur 70. C_r och k_c som funktion av h_e
SS 2258



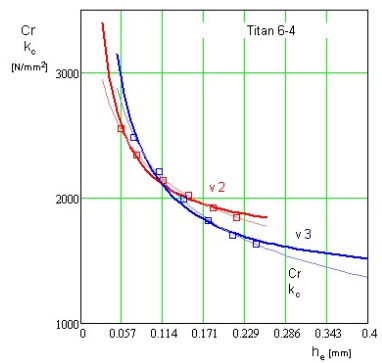
Figur 71. F_c mätta och modellerade värden SS 2258



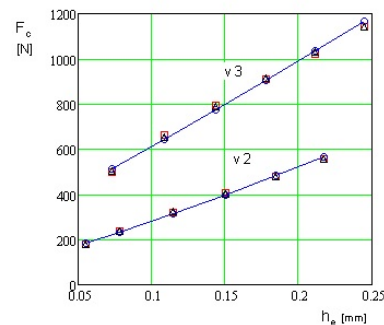
Figur 72. C_r och k_c som funktion av h_e
Inconel 718



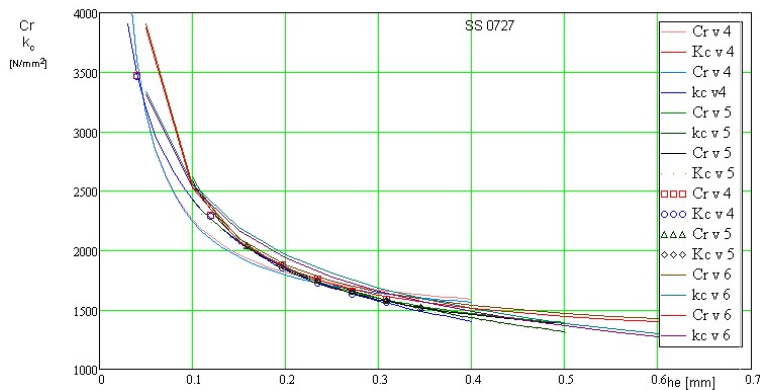
Figur 73. F_c mätta och modellerade värden Inconel 718



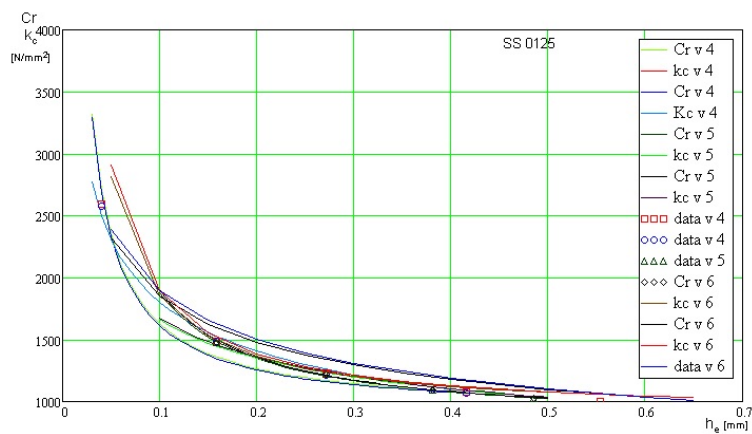
Figur 74. C_r och k_c som funktion av h_e
Titan 6-4



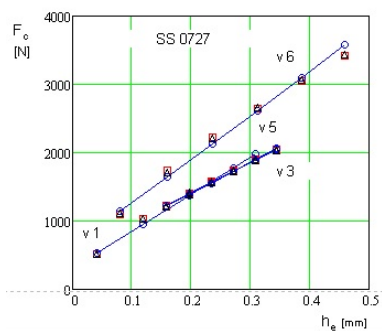
Figur 75. F_c mätta och modellerade värden Titan 6-4



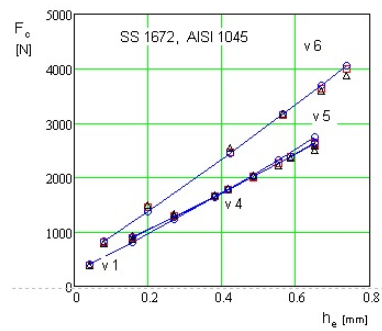
Figur 76. Cr och k_c som funktion av h_e SS 0727



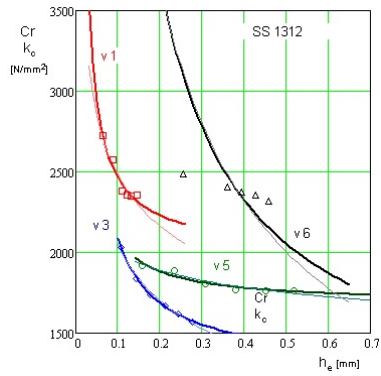
Figur 77. Cr och k_c som funktion av h_e , SS 0125



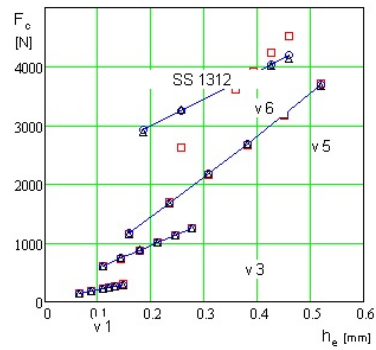
Figur 78. F_c uppmätta och modellerade värden SS 0727



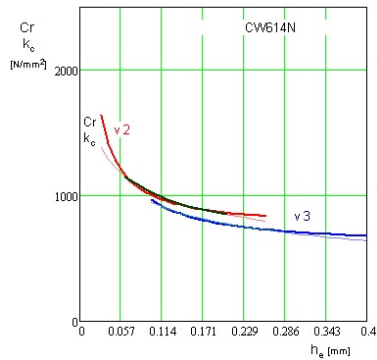
Figur 79. F_c modellerade och uppmätta värden SS 0125



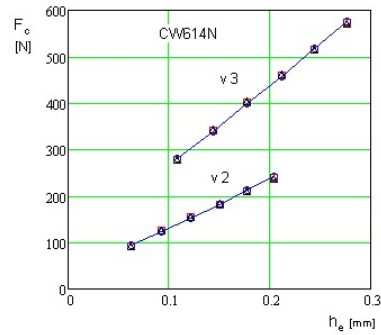
Figur 80. *Cr och kc som funktion av he SS 1312*



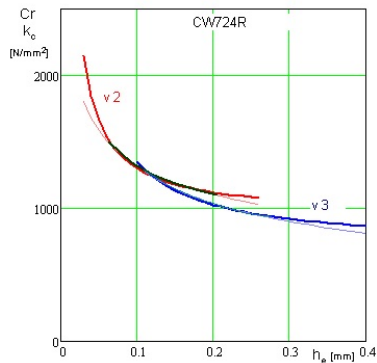
Figur 81. *Fc uppmätta och modellerade värden SS 1312*



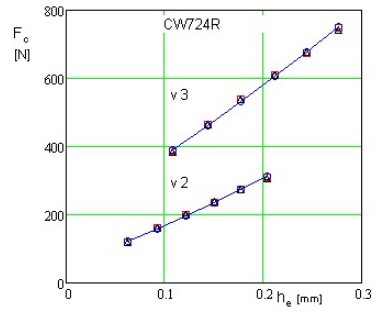
Figur 82. *Cr och kc som funktion av he CW614N*



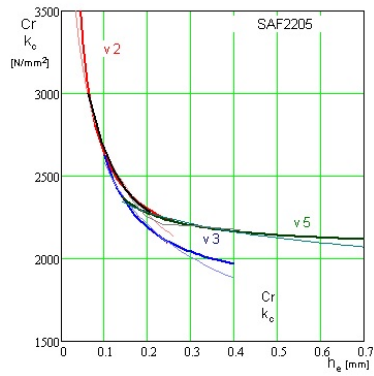
Figur 83. *Fc uppmätta och modellerade värden CW614N*



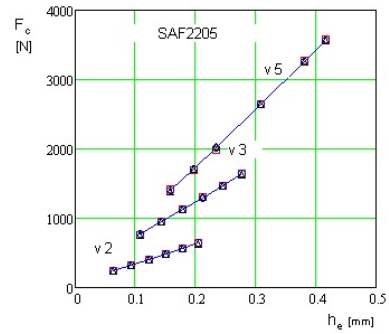
Figur 84. *Cr uppmätta och modellerade värden CW614N*



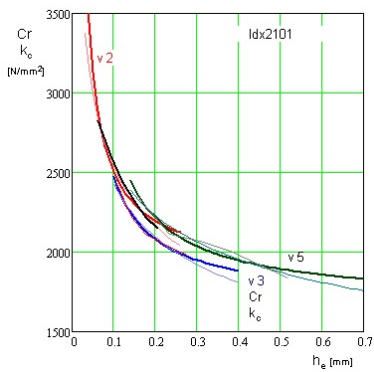
Figur 85. *Fc uppmätta och modellerade värden CW724R*



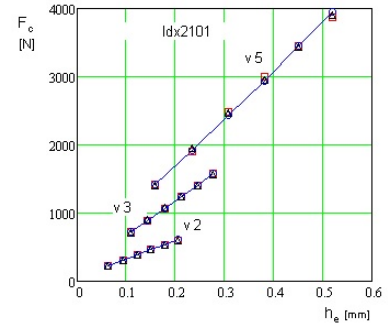
Figur 86. *Cr och kc som funktion av he SAF 2205*



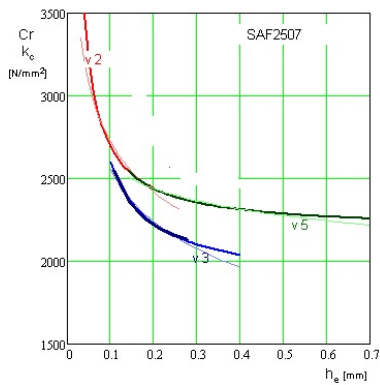
Figur 87. *Modellerade och uppmätta Fc SAF2205*



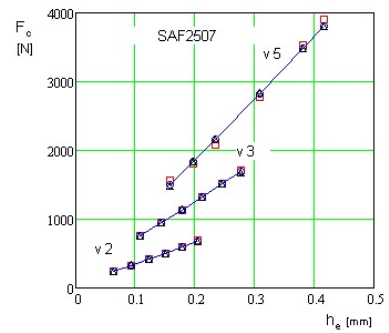
Figur 88. *Cr och kc som funktion av he ldx2101*



Figur 89. *Modellerade och uppmätta Fc ldx2101*



Figur 90. *Cr och kc som funktion av he SAF 2507*



Figur 91. *Modellerade och uppmätta Fc SAF2507*

8.4 Appendix D Statiska Skärkrafter Konstanter

Tabell 45 Resultat statiska skärkrafter för alla skär

Mtrl	Grupp	Skär	a_p	v_c	Cr₁	Cr₂	Er%
2541	P	1	0.5	410	2119	60.2	1.4
2541	P	3	2	325	1752	71.2	0.4
2541	P	5	3	260	1783	101	0.3
2541	P	6	4	210	1720	112.7	0.72
1672	P	1	0.5	410	1694	60.1	0.89
1672	P	3	2	325	1595	91.5	0.36
1672	P	5	3	260	1841	71.7	0.31
1672	P	6	4	210	1791	94	0.17
2244	P	1	0.5	410	2134	69.6	1.2
2244	P	3	2	325	1622	85	0.4
2244	P	5	3	260	1910	73.1	0.6
2244	P	6	4	210	1875	90.5	0.5
0727	K	4	3	260	1338	90.6	3.6
0727	K	4	3	260	1367	89.4	3.6
0727	K	5	3	265	1084	150	0.4
0727	K	5	3	265	1085	153.4	0.5
0727	K	6	4	240	1175	135	3.4
0727	K	6	4	240	1200	135	3.7
2348	M	2	1	240	1804	73.6	1
2348	M	3	2	180	1482	85.5	0.2
2348	M	5	3	135	1778	91.3	0.3
2348	M	2	1	115	1917	61.3	0.97
0125	K	4	3	260	896	71.8	4.2
0125	K	4	3	260	902	72.4	4.3
0125	K	5	3	265	810	107	0.6
0125	K	6	4	240	876	101.6	2.9
0125	K	6	4	240	881	96.7	2.3

Mtrl	Grupp	Skär	a_p	v_c	Cr₁	Cr₂	Er%
0125	K	5	3	265	809	109	0.5
2258	P	1	0.5	410	2208	56.8	1.8
2258	P	3	2	325	1716	82.1	0.4
2258	P	5	3	260	2171	60.2	1
2258	P	6	3.5	210	2021	87	0.4
Inconel718	S	3	2	35	2070	137.7	2.4
Inconel718	S	2	1	50	2481	93.9	2.8
Titan 6-4	S	2	1	65	1643	52.8	1.4
Titan 6-4	S	3	2	35	1286	93	2.1
Idx 2101	M	2	1	240	1884	62.35	1.5
Idx 2101	M	3	2	180	1687	78.7	0.56
Idx 2101	M	5	3	135	1751	85	1.9
SAF2507	M	2	1	240	2185	51	0.94
SAF2507	M	3	2	180	1853	74	0.36
SAF2507	M	5	3	135	2186	51	2.4
2205	M	2	1	240	1969	66	0.59
2205	M	2	2	180	1747	88	0.36
2205	M	3	3	135	2052	45	0.93
CW614N	N	2	1	250	731	27	1.1
CW614N	N	3	2	250	582	38	0.55
CW724R	N	2	1	250	940	36	0.9
CW724R	N	3	2	250	707	64	0.6
V-2158-60	P	1	0.5	410	1987	82	1.12
V-2158-60	P	3	2	325	1503	82	0.25
V-2158-60	P	5	3	260	1805	64	0.7
V-2158-60	P	6	3.5	210	1793	69	0.3
1312	P	1	0.5	410	2476	26	0.85
1312	P	3	2	325	1513	73	0.33
1312	P	5	3	260	1880	67	0.3
1312	P	6	3	210	1749	95	0.58

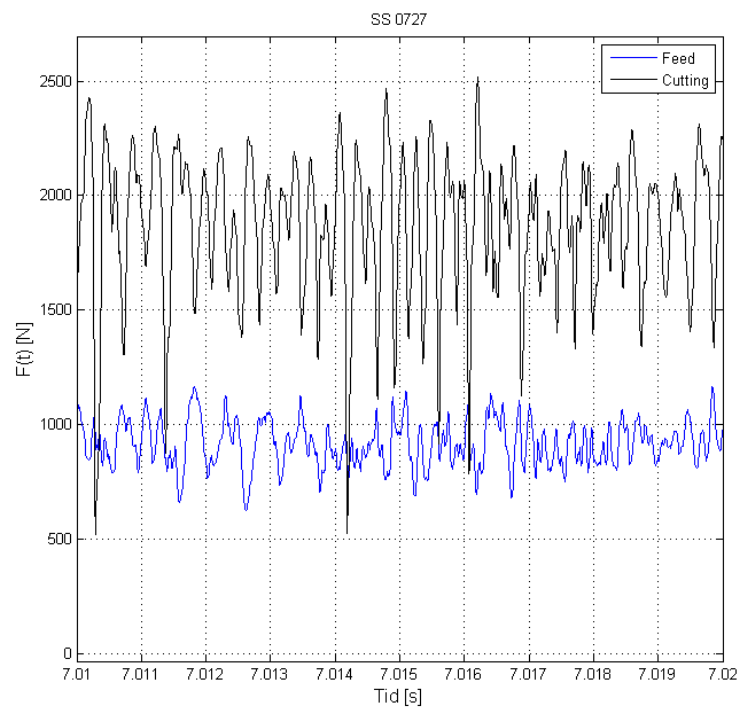
Mtrl	Grupp	Skär	a_p	v_c	k_{c1.1}	m_c	Er%
2541	P	1	0.5	410	1481	0.27	3
2541	P	3	2	325	1557	0.19	0.8
2541	P	5	3	260	1750	0.17	0.95
2541	P	6	4	210	1710	0.18	0.95
1672	P	1	0.5	410	1124	0.32	2.62
1672	P	3	2	325	1383	0.25	1.1
1672	P	5	3	260	1811	0.12	0.95
1672	P	6	4	210	1778	0.15	0.52
2244	P	1	0.5	410	1442	0.3	2.7
2244	P	3	2	325	1416	0.23	1
2244	P	5	3	260	1881	0.12	1.3
2244	P	6	4	210	1864	0.13	0.9
0727	K	4	3	260	978	0.4	0.44
0727	K	4	3	260	1002	0.39	0.28
0727	K	5	3	265	1011	0.37	0.22
0727	K	5	3	265	1013	0.38	0.11
0727	K	6	4	240	1043	0.38	0.51
0727	K	6	4	240	1065	0.38	0.59
2348	M	2	1	240	1383	0.27	0.352
2348	M	3	2	180	1283	0.25	0.765
2348	M	5	3	135	1747	0.16	1.1
2348	M	2	1	115	1523	0.23	0.23
0125	K	4	3	260	791	0.36	2.9
0125	K	4	3	260	797	0.36	2.78
0125	K	5	3	265	839	0.3	1.4
0125	K	6	4	240	874	0.34	1.3
0125	K	6	4	240	876	0.33	1.89
0125	K	5	3	265	838	0.3	1.9
2258	P	1	0.5	410	1730	0.21	2.3
2258	P	3	2	325	1508	0.22	1

Mtrl	Grupp	Skär	a_p	v_c	k_{c1.1}	m_c	Er%
2258	P	5	3	260	2146	0.09	1.5
2258	P	6	3.5	210	1996	0.13	0.4
Inconel718	S	3	2	35	1598	0.34	1.2
Inconel718	S	2	1	50	1890	0.27	1.3
Titan 6-4	S	2	1	65	1290	0.24	0.23
Titan 6-4	S	3	2	35	986	0.36	0.77
Idx 2101	M	2	1	240	1486	0.23	0.38
Idx 2101	M	3	2	180	1487	0.21	1.2
Idx 2101	M	5	3	135	1642	0.19	1.2
SAF2507	M	2	1	240	1831	0.17	1.8
SAF2507	M	3	2	180	1659	0.19	0.97
SAF2507	M	5	3	135	2169	0.075	2.655
2205	M	2	1	240	1555	0.245	0.55
2205	M	2	2	180	1525	0.23	0.52
2205	M	3	3	135	2016	0.077	1.151
CW614N	N	2	1	250	568	0.25	0.33
CW614N	N	3	2	250	498	0.28	0.3
CW724R	N	2	1	250	727	0.26	0.33
CW724R	N	3	2	250	594	0.35	0.4
V-2158-60	P	1	0.5	410	1418	0.3	1.75
V-2158-60	P	3	2	325	1307	0.24	0.8
V-2158-60	P	5	3	260	1778	0.11	1.1
V-2158-60	P	6	3.5	210	1771	0.12	0.25
1312	P	1	0.5	410	2167	0.1	0.715
1312	P	3	2	325	1325	0.22	0.45
1312	P	5	3	260	1847	0.115	0.5
1312	P	6	3	210	1717	0.16	0.58

8.5 Appendix F Dynamiska Skärkrafter

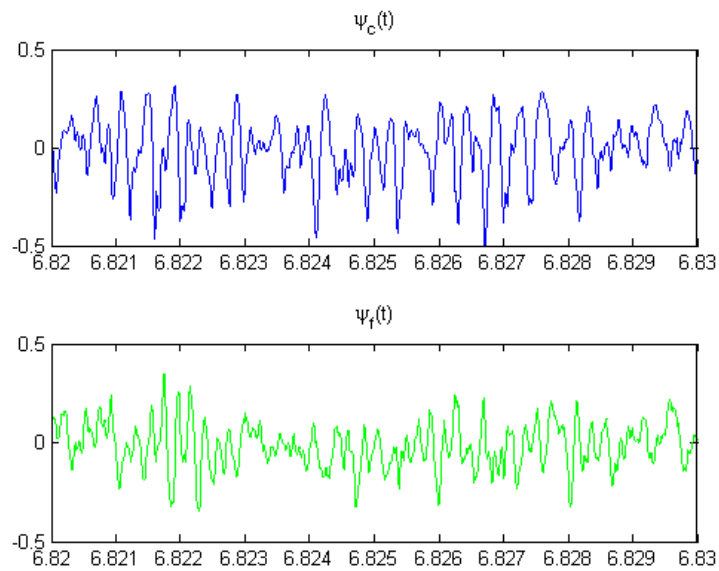
I appendix B presenteras diagram över dynamiska skärkrafter och variationsfaktorer.

Material	a_p [mm]	v_c [m/s]	f [mm/rev]
SS 0125	3	150	0.5
SS 0727	3	150	0.5
SS 1672	3	150	0.5
SS 2244	3	150	0.5
SS 2348	3	150	0.5
Inconel718	2	30	0.1; 0.2; 0.3

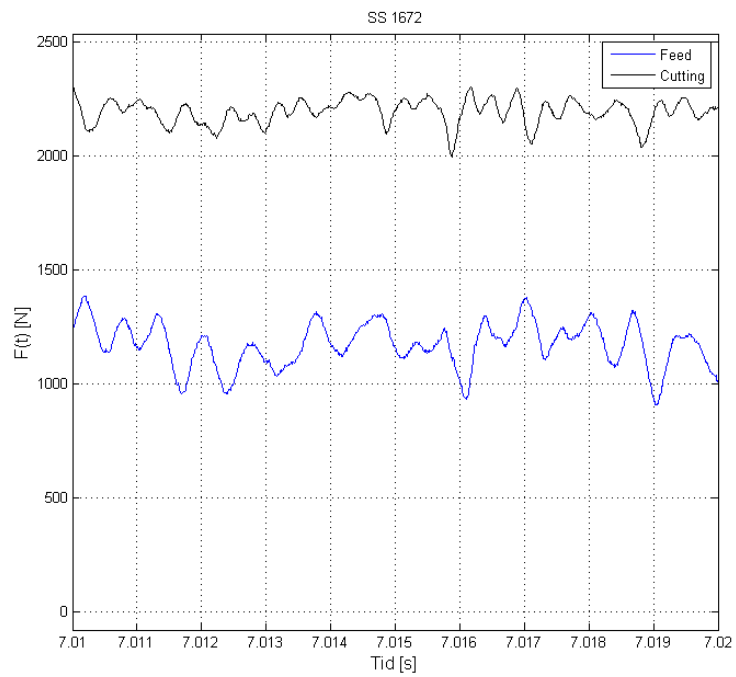


Figur 92 *Dynamiska skärkrafter SS0727*

$a_p=3\text{ mm}$, $v_c=150\text{ m/s}$, $f=0.5\text{ mm/varv}$

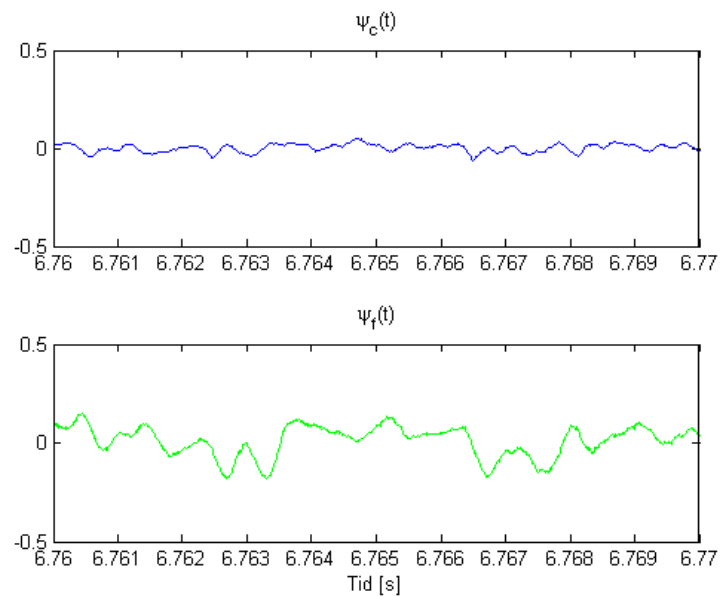


Figur 93 *Variationsfaktorer SS0727*

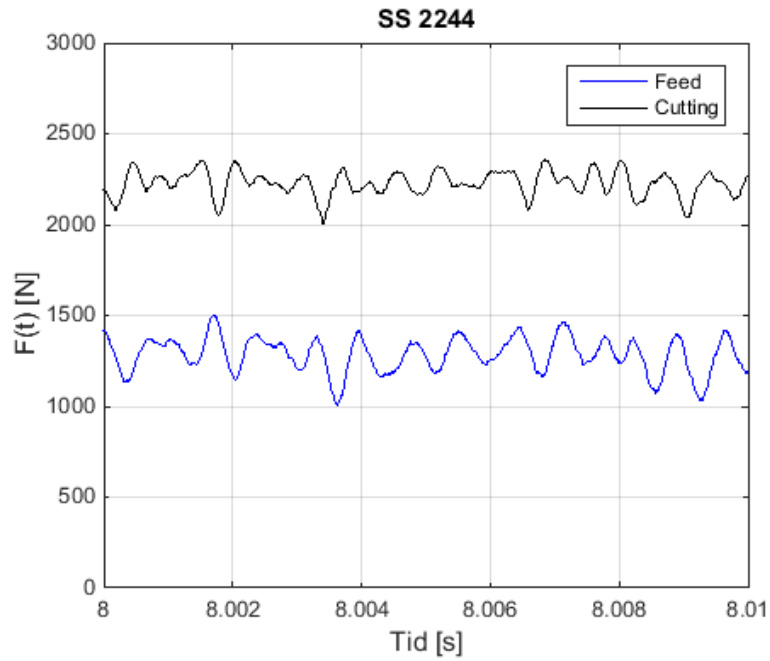


Figur 94 Dynamiska skärkrafter SS1672

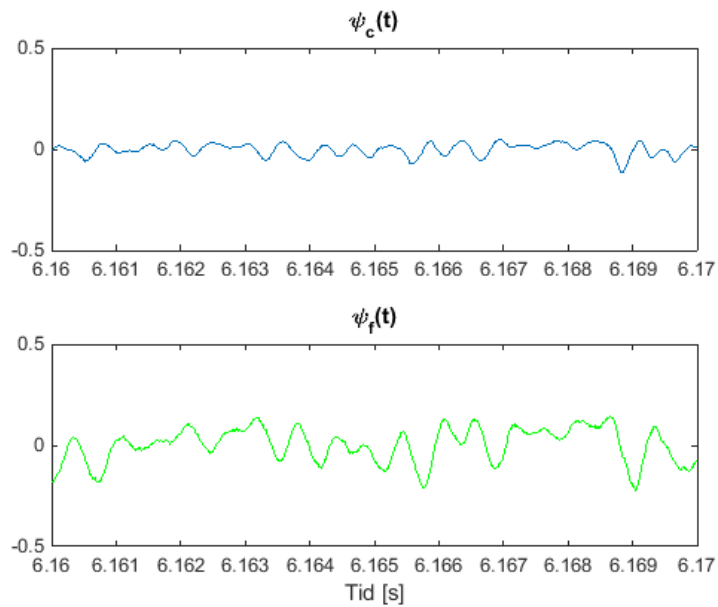
$a_p=3\text{ mm}$, $v_c=150\text{ m/s}$, $f=0.5\text{ mm/varv}$



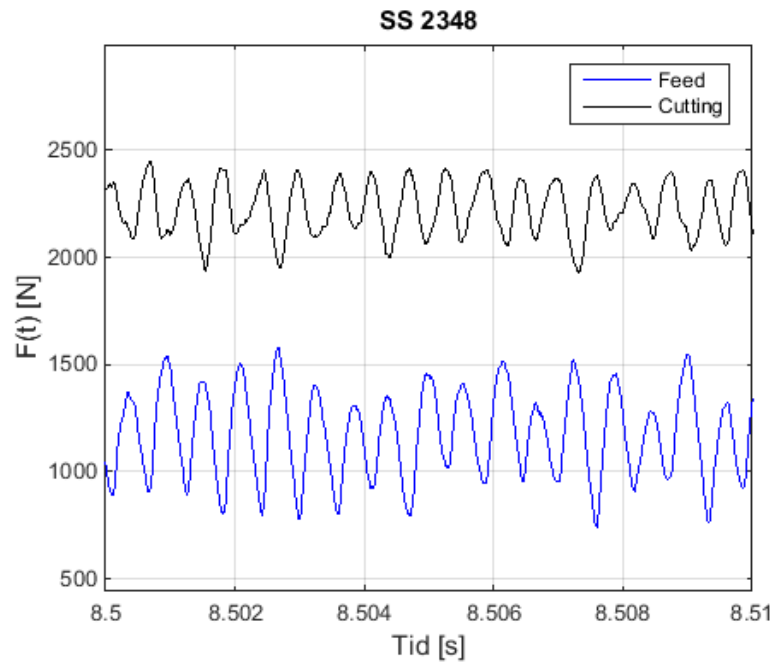
Figur 95 Variationsfaktorer SS1672



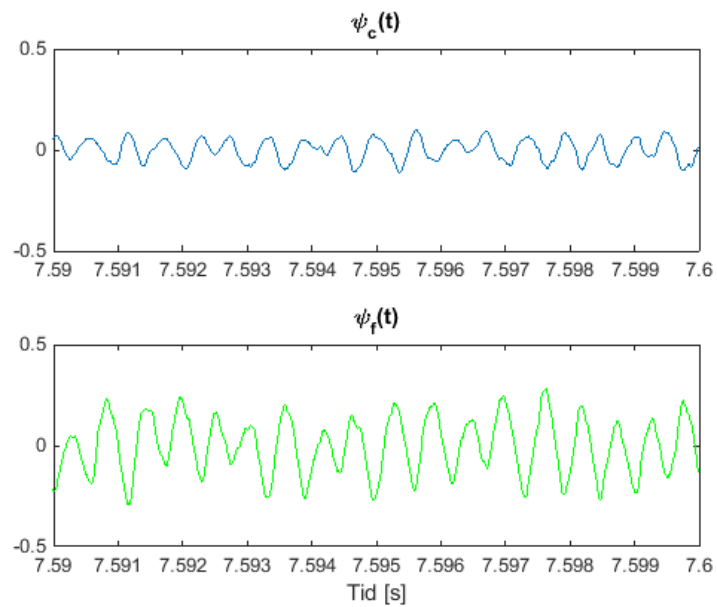
Figur 96 Dynamiska skärkrafter SS 2244
 $a_p=3 \text{ mm}$, $v_c=150 \text{ m/s}$, $f=0.5 \text{ mm/varv}$



Figur 97 Variationsfaktorer SS 2244



Figur 98 Dynamiska skärkrafter SS2348
 $a_p=3 \text{ mm}$, $v_c=150 \text{ m/s}$, $f=0.5 \text{ mm/varv}$



Figur 99 Variationsfaktorer SS 2348