



NTNU

Det skapende universitet

VOLVO AERO

Høyeffektiv fresing med keramiske skjær

Maskineringsforum Mo i Rana 24.-25. August 2011

Terje Juul Barstad

Manufacturing Engineer – Rolls-Royce Marine, Ulsteinvik

Agenda

- Introduksjon – Deltakere, Bedrift, Studiested og Oppgave
- Introduksjon – Superlegeringer og keramiske skjær
- Masteroppgave Vår 2010
 - Optimalisering av skjæredata – Inconel 718
 - Reslipte skjær
 - Sammenlikning med andre produsenter og reslipte skjær
 - Maskineringsforsøk hos VAN
 - Erfaringer med Keramikk
 - Råd til optimalisering

Introduksjon – Deltakere

- Kandidaten
 - Terje Juul Barstad
 - Manufacturing Engineer hos Rolls-Royce Marine, avd Ulsteinvik.
 - 4 års erfaring som flymekaniker før studiet.
- Veileder, NTNU  NTNU – Trondheim
Norwegian University of
Science and Technology
 - Professor Knut Sørby
 - Institutt for Produksjons og Kvalitetsteknikk.
 - Styret i Maskineringsforum
- Veileder, VAN 
 - Leif A. Andersen
 - Produksjonsingeniør.
 - Styret i Maskineringsforum

Introduksjon – Om Bedriften

- VAN ligger i industriclusteret i Kongsberg
- Flymotorproduksjonen på Kongsberg startet 1977
- Produserer metalliske komponenter til jetmotorer
 - 75% sivile motorer til fly over 100 passasjerer, 25% til jetjagere
- Maskinering av komponenter i høfaste metaller
 - Inconel 718, Inconel 100 MOD, Rene 77, Haynes 282, Waspalloy, Titan, høylegerte og lavlegerte stål

100% eid av Volvo Aero Corporation
Omsetning: ca 1 000 MNOK
Ansatte: ca 540



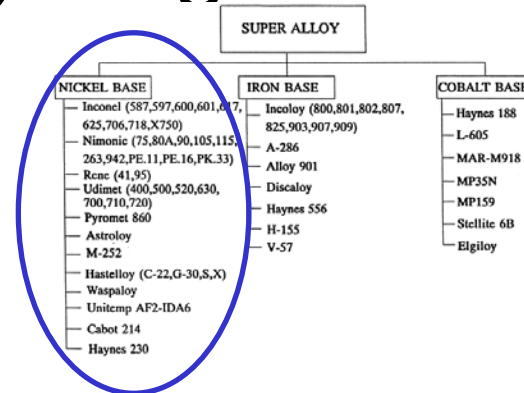
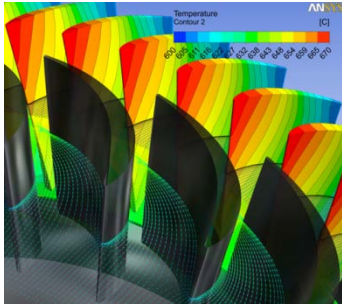
NTNU

Det skapende universitet

Introduksjon – Om Studiet

- NTNU
 - Produktutvikling og Produksjon (Maskin)
 - Institutt for Produksjons- og Kvalitetsteknikk <http://www.ntnu.no/ipk/>
 - Studieretning Produksjonssystemer
 - Fokuserer på produksjonsutstyr, sammenkobling og automatisering av dette til produksjonslinjer. Det fokuseres også på maskinering av produkter med kompleks geometri samt på dataløsninger for teknologisk planlegging og styring av produksjon.
 - For personer som ønsker en jobb hvor man er i nær tilknytning til det man produserer, er dette en bra utdanning.
 - Anbefaler medlemmer av Maskineringsforum og fremme dette studiet til mulige søkere (Både 5 årig studium og 2 årig påbygging av Bachelor grad).
 - Nærmere informasjon om studieretning: <http://www.ivt.ntnu.no/docs/pup/Studieretningsinfo2011.pdf>

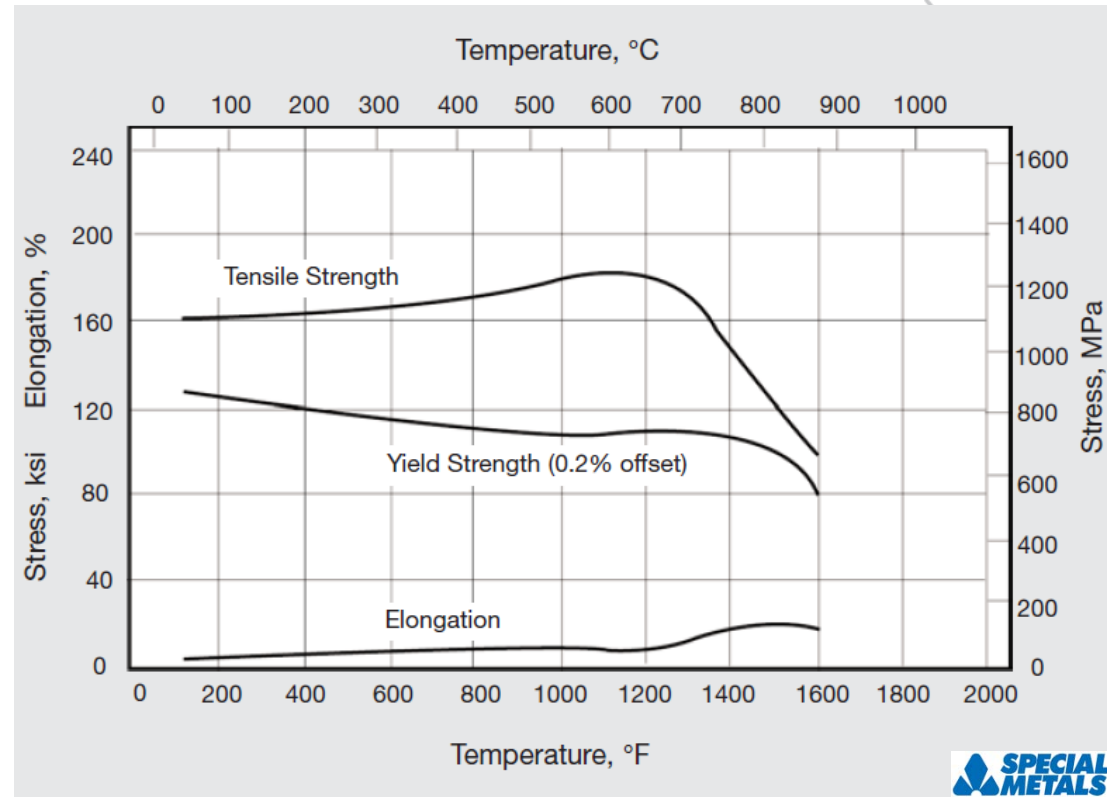
Introduksjon – Superlegeringer



- Fokus på nikkelbaselegeringer (Inconel 625 i Prosjektoppgave og Inconel 718 i Masteroppgave).
 - Nikkelbaselegeringer står for ca. 50% av en flymotors vekt (varme deler av motoren)
 - Eksepsjonell styrke, varmemotstand og evne til å beholde sine mekaniske egenskaper ved høye temperaturer i brennkammer og turbin.
 - Regnes på grunn av dette som en av verdens dårligst maskinerbare legeringer.

Introduksjon – Superlegeringer

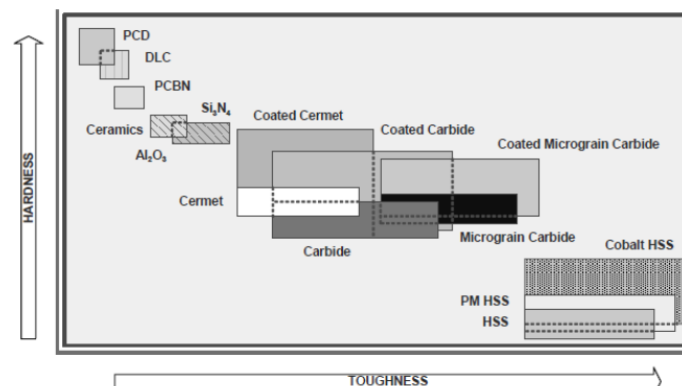
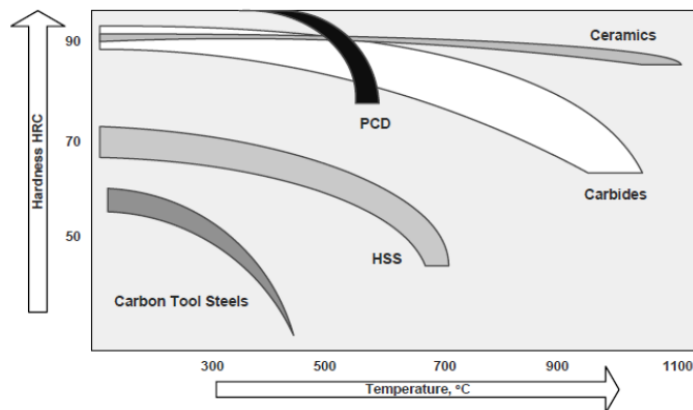
Chromium.....	15.5-16.5
Cobalt.....	14.0-15.5
Molybdenum.....	2.75-3.25
Tungsten.....	1.00-1.50
Titanium.....	4.75-5.25
Aluminum.....	2.25-2.75
Carbon.....	0.01-0.02
Zirconium.....	0.025-0.05
Boron.....	0.01-0.02
Nickel.....	Balance*



Introduksjon – Keramiske Verktøy

- Introdusert i 1950 årene
- Består hovedsakelig av sintret finkornet aluminiumsoksid
- Fire Hovedkategorier
 - Ren Keramikk
 - Blandingskeramikk
 - Fiberforsterket (Whisker) keramikk
 - Silisiumnitrid Keramikk (SiAlON)
- Beholder sin hardhet ved høye temperaturer. Med høy hardhet kommer dessverre også en lav seighet.

	$(Al_2O_3 + ZrO_2)$	$(Al_2O_3 + TiC)$	$(Al_2O_3 + SiC_{10})$	(Si_3N_4)
Seighet				
Hardhet				
Motstand mot varmesjokk				
Kjemisk stabilitet (Fe) * (Grått støpejern)				
Kjemisk stabilitet (Ni)				



Introduksjon – Høyeffektiv Fresing

- Hardmetallskjær
 - High Speed Machining defineres på Inconel 718 som skjærehastigheter over 50 m/min.

The logo for Hardmilling.com features the word "HARDMILLING" in a bold, orange, 3D-style font with a black outline. The ".com" is in a smaller, white font. The text is set against a white, horizontal, tapered shape that resembles a mill bit, which is centered on a black background.

HARDMILLING.com

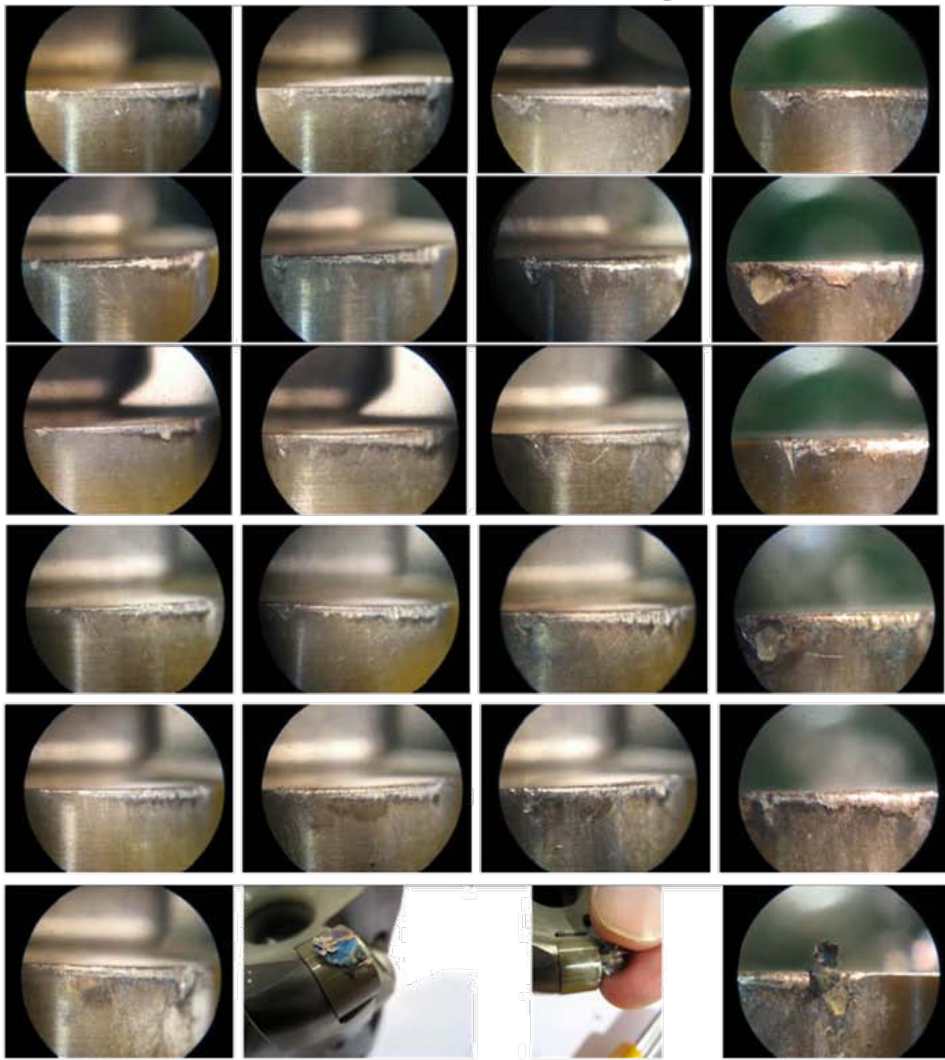
Introduksjon – Høyeffektiv Fresing

- Keramiske Skjær
 - Keramiske skjær kan gi en 10 – 40 dobling i skjærehastighet sammenliknet med Hardmetall med “High Speed Machining”.




HARDMILLING.com

Optimalisering av skjæredata



Vc = 1100 m/min
(5558 o/min)

Vc = 1187 m/min
(6000 o/min)

Vc = 1286 m/min 
(6500 o/min)

Vc = 1385 m/min
(7000 o/min)

Vc = 1484 m/min
(7500 o/min)

Vc = 1583 m/min
(8000 o/min)

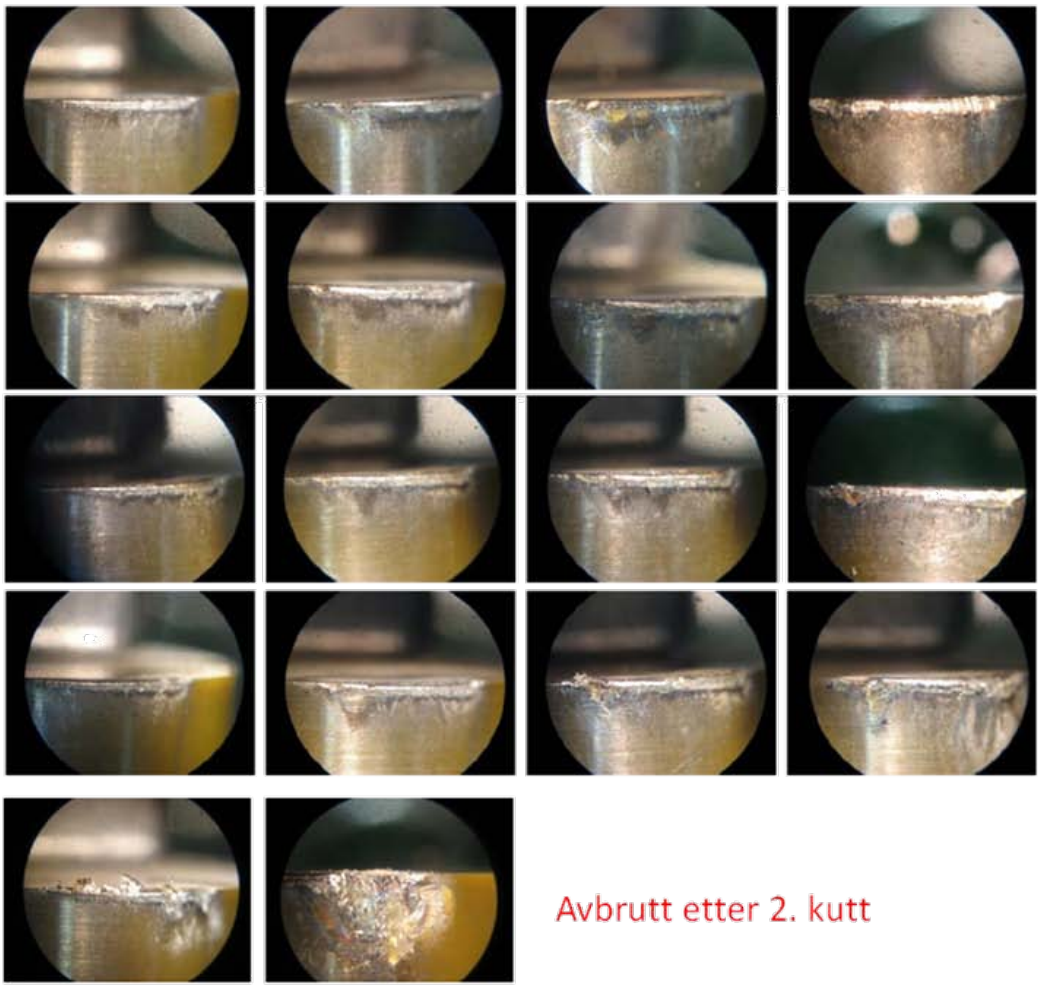
(Alle forsøk: fz = 0.08 mm/tann)



NTNU

Det skapende universitet

Optimalisering av skjæredata



$f_z = 0.12 \text{ mm/tann}$

$f_z = 0.16 \text{ mm/tann}$ 

$f_z = 0.18 \text{ mm/tann}$

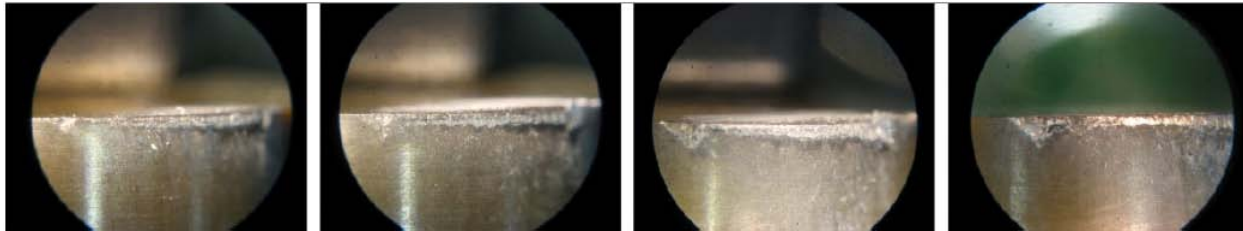
$f_z = 0.20 \text{ mm/tann}$

$f_z = 0.24 \text{ mm/tann}$

Avbrutt etter 2. kutt

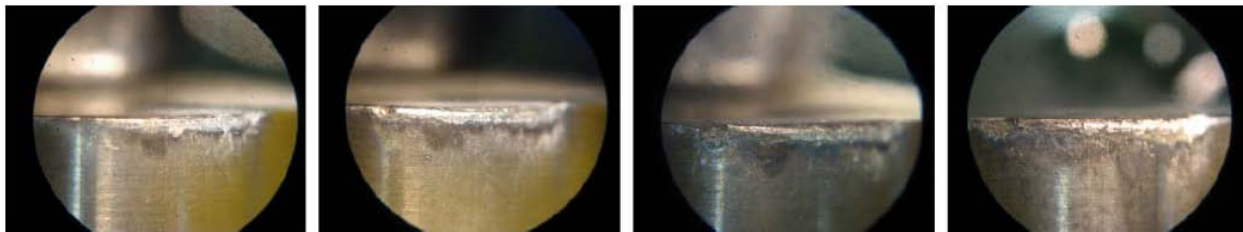
(Alle forsøk: $V_c = 1286 \text{ m/min}$)

Optimalisering av skjæredata



VAN's parametre
 $V_c = 1100 \text{ m/min}$
 $F_z = 0.08 \text{ mm/tann}$

Forsøk 1	Venstre Notch	Friflate	Høyre Notch
Etter Kutt 1		0.27 [mm]	
Etter Kutt 2	0.60 [mm]	0.37 [mm]	0.67 [mm]
Etter Kutt 3	0.64 [mm]	0.37 [mm]	0.69 [mm]
Etter Kutt 4/5	0.64 [mm]	0.38 [mm]	0.78 [mm]

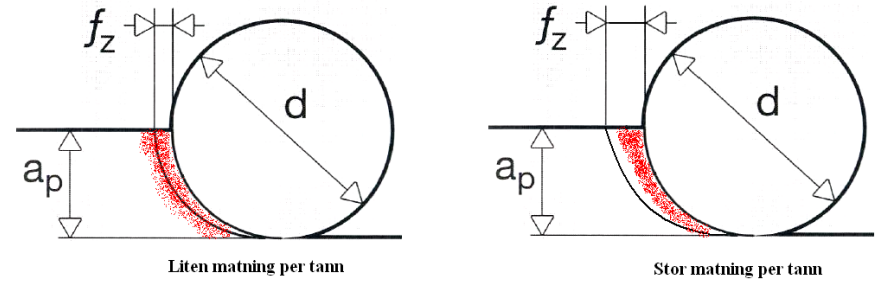


NTNU's anbefaling
 $V_c = 1286 \text{ m/min}$
 $f_z = 0.16 \text{ mm/tann}$

Forsøk 8	Venstre Notch	Friflate	Høyre Notch
Etter Kutt 1	0 [mm]	0.26 [mm]	0.43 [mm]
Etter Kutt 2	0 [mm]	0.37 [mm]	0.39 [mm]
Etter Kutt 3	0.54 [mm]	0.39 [mm]	0.56 [mm]
Etter Kutt 4/5	0.55 [mm]	0.61 [mm]	0.69 [mm]

Optimalisering av skjæredata

- Hvordan kan det ha seg at høyere skjærehastighet og matning fører til en lavere slitasje? Et hardmetallskjær ville fått kortere og kortere levetid...
 - ”Hopper over” sjikt herdet av forrige kutt?
 - Det anbefales å ha store radielle inngrep ved maskinering av nikkelbaselegeringer pga arbeidsherding.

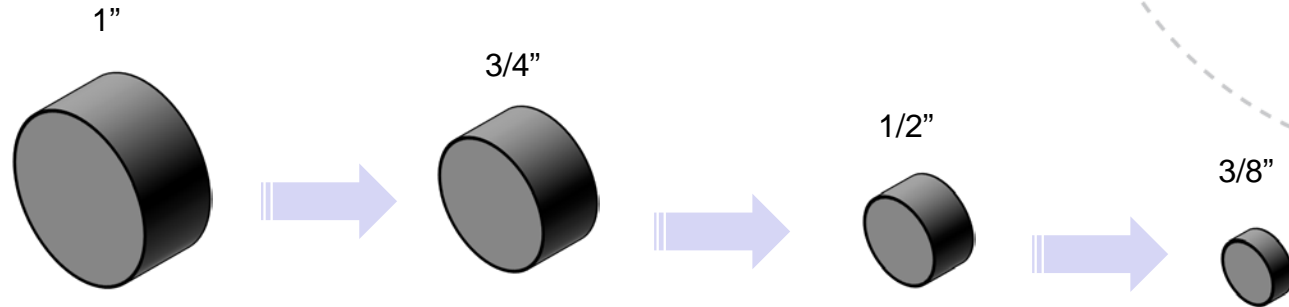


- En annen teori er at all varme vil forsvinne i spon ved høyere matning, slik at emnet ikke arbeidsherder.
 - Redusert temperaturvariasjon?
 - Keramikk liker ikke temperaturvariasjoner.

Optimalisering av skjæredata

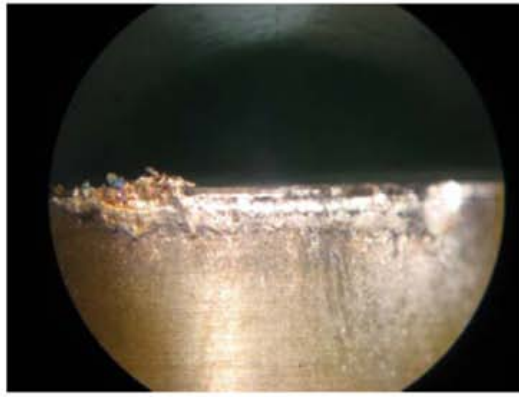
- Anbefalt økning i bordmatning (produktivitet): 233 %
(fra 1750 til 4083 mm/min).
(Verd å nevne at VAN benyttet verktøyproduusents anbefalinger
grunnet en rask oppstart).
- Verktøyslitasje: Like god som ved lavere hastighet – økning av
hastighet fører **ikke til økt slitasje!**
(Usikkert hvilken hovedmekanisme, men jevnere fordelt
temperatur kan være utslagsgivende).
- Konklusjon: VAN's bearbeidingsparametre kan økes! 😊

Resliping av skjær

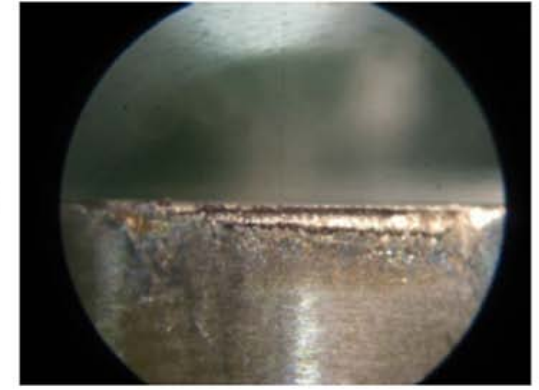


Resliping av skjær går i hopp, i både diameter og tykkelse. Endringen i geometri er stor - og må være stor. Små skjær **må** kjøres mer forsiktig enn store

Sammenlikning - Reslipte skjær

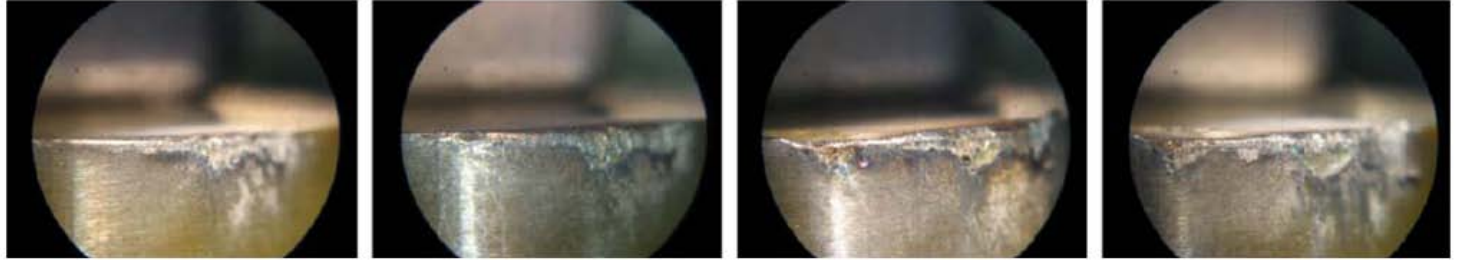


Ny

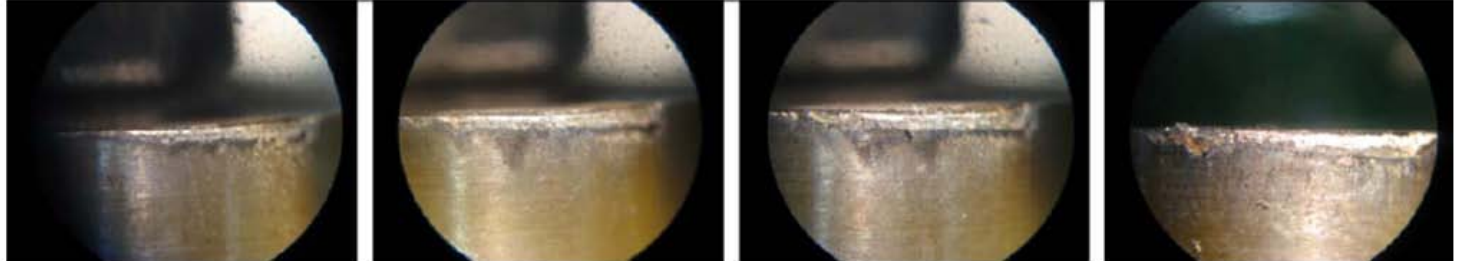


Reslipt

Reslipt

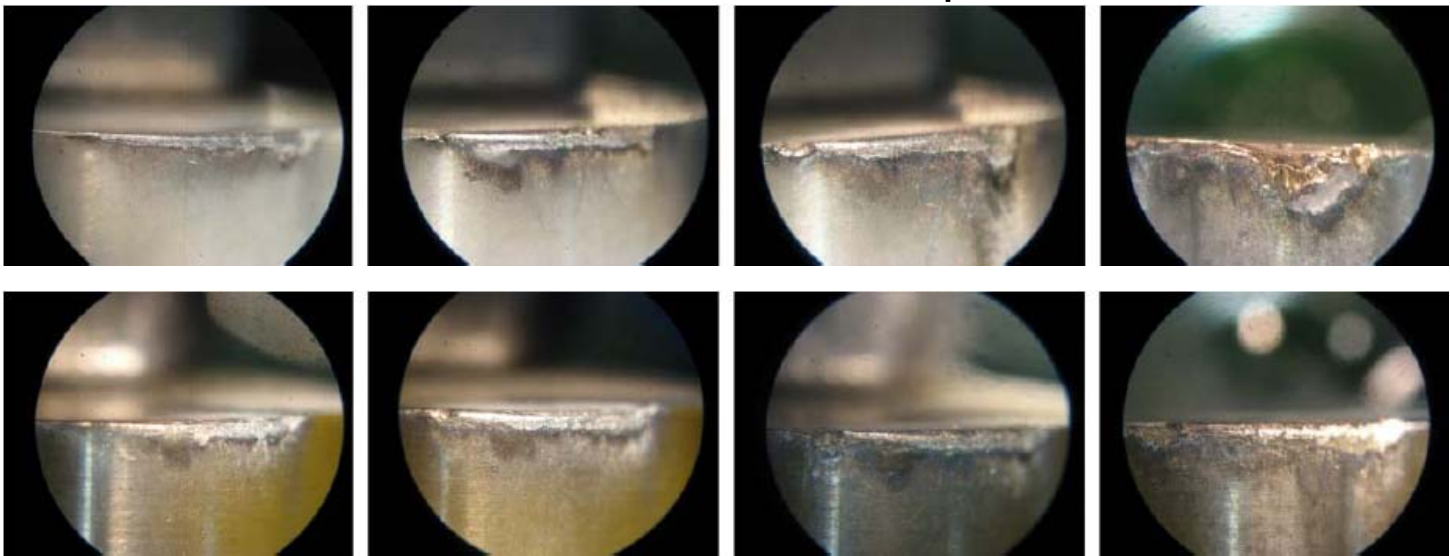


Ny



Sammenlikning – Produsent X

- Produsent X: "Motfres med keramiske skjær"
- Kennametal: "Medfres med keramiske skjær"
- NTNU Test: Medfresing
- $V_c=1286$ m/min, $f_z=0.16$ mm/tann, $a_p=2.0$ mm, $a_e=22.2$ mm

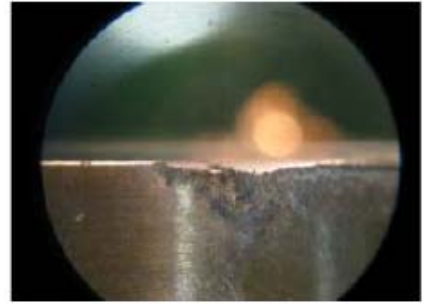
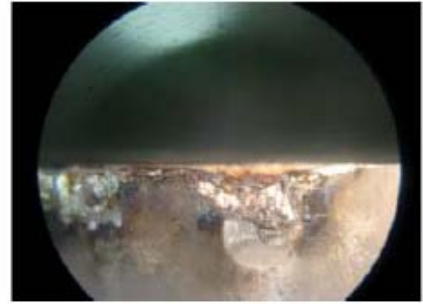
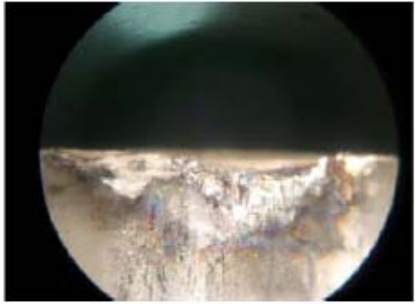


Produsent X
(0.04mm radie)

Kennametal
KY1540
0.10mm tilspissing

Sammenlikning - Produsent X

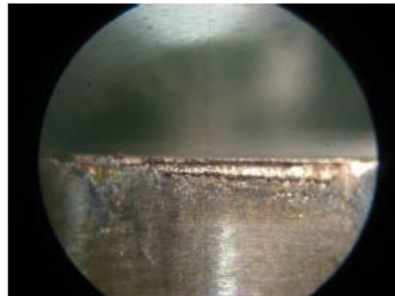
- $V_c=1286$ m/min, $f_z=0.16$ mm/tann, $a_p=2.0$ mm, $a_e=22.2$ mm
- Kontinuerlig inngrep uten mellommåling



Produsent X
(Etter 1.25 runde)
(Forsøk Avbrutt)

Produsent X
(etter nye 0.25 runde)
(Forsøk Avbrutt)

Kennametal KY1540
(etter avsluttende 1.50 runde)



Reslipt!
Kennametal
KY1540
0.10mm tilspissing

Sammenlikning - Produsent X

- Hva sier Produsent X til dette?
 - Produsent X anbefaler ikke matning over 0.12mm/tann

$f_z = 0.12 \text{ mm/tann}$



Ceramic cutter, Insert grade CC6060,
 z_n 4, D_3 63 mm, v_c 1000 m/min, a_e 32 mm,
 f_z 0.12 mm/tooth, a_p 1.5 mm, Material: Waspalloy

$f_z = 0.10 \text{ mm/tann}$



Ceramic cutter, Insert grade CC6060,
 z_n 4, D_3 63 mm, v_c 1000 m/min, a_e 32 mm,
 f_z 0.1 mm/tooth, a_p 1.5 mm, Material: Waspalloy



NTNU

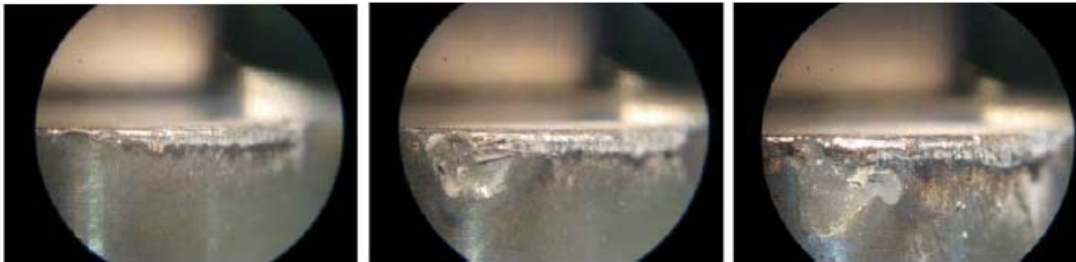
Det skapende universitet

Sammenlikning Produsent X

- Konklusjon:
 - En meget urettferdig test for Produsent X, i og med man ikke motfreste. (Faktum er dessverre at VAN både med og motfreser på samme del).
 - Produsenten fortjener en egen optimalisering, men resultatene tilsier at man ikke kan benytte disse skjærene direkte i produksjon ved de nye anbefalte bearbeidingsparametrene.
 - VAN anbefales å kjøre en egen optimalisering med motfresing, hvis det er aktuelt og endre verktøybaner.
 - Det kan også hende at verktøygeometrien var avgjørende for utfallet, er en T-egg bedre enn E-geometri?

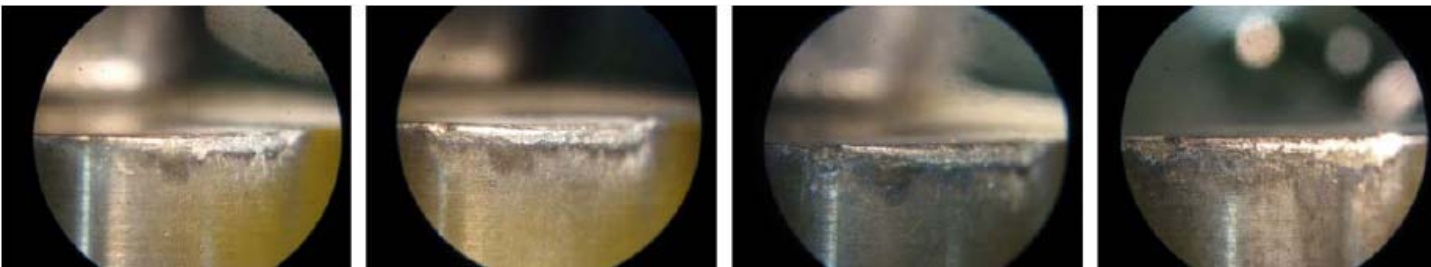
Sammenlikning - Produsent Y

- Produsent Y: Ingen preferanser angående med/motfresing.
- $V_c=1286$ m/min, $f_z=0.16$ mm/tann, $a_p=2.0$ mm, $a_e=22.2$ mm



**Forsøk Avbrutt
Etter 3 av 4 kutt**

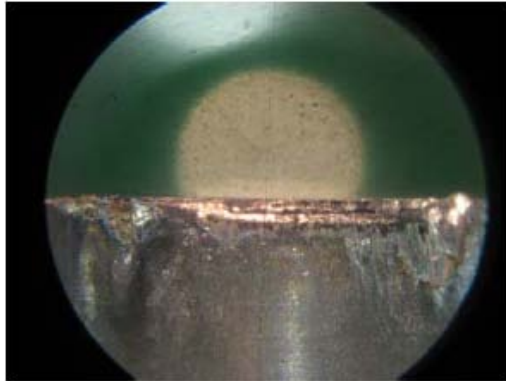
Produsent Y
0.10mm tilspissing



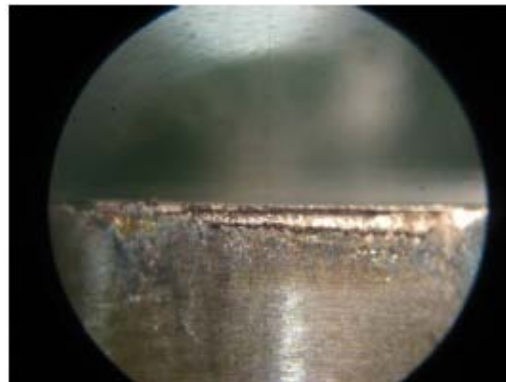
**Kennametal
KY1540**
0.10mm tilspissing

Sammenlikning Produsent Y

- $V_c=1286$ m/min, $f_z=0.16$ mm/tann, $a_p=2.0$ mm, $a_e=22.2$ mm
- Kontinuerlig inngrep uten mellommåling



Produsent Y
0.10mm tilspissing



Reslipt!
Kennametal
KY1540
0.10mm tilspissing

Sammenlikning Produsent Y

- Konklusjon:
 - Produsenten fortjener en egen optimalisering, men resultatene tilsier at man ikke kan benytte disse skjærene direkte i produksjon ved de nye anbefalte bearbeidingsparametrene.
 - VAN anbefales å kjøre en egen optimalisering på denne typen skjær.

Maskineringsforsøk hos **VOLVO AERO**



Maskineringsforsøk hos VAN

- Mål 1: Bevise at reslipte skjær kan benyttes direkte i produksjonen – OK
- Mål 2: Bevise at VAN kan øke sine bearbeidingsparametre, og at dette ikke vil påvirke verktøylevetiden.
 - Gamle parametre: $V_c=1100$ m/min, $f_z=0.08$ mm/tann
 - Anbefalt fra NTNU: $V_c=1286$ m/min, $f_z=0.16$ mm/tann
- Økte parametrene gradvis, og gav oss da man fikk over 70 % på spindelbelastningen (maskinsikring på 80 %).
 - Resultat: $V_c=1286$ m/min, $f_z=0.10$ mm/tann
 - Produktivitet: Økning på ca. 46 %
(Delene produsere 46 % raskere)
 - Kostnadsbesparelse: 23 og 25 % for 80 og 63 mm fres
- Erfaringer:
 - Maskinoperatør opplevde at prosessen gav mindre verktøyslitasje.
 - Prosessen gikk med mindre støy (brumming og lydnivå).
 - Keramiske skjær har det best når de holdes varme!

Maskineringsforsøk hos VAN

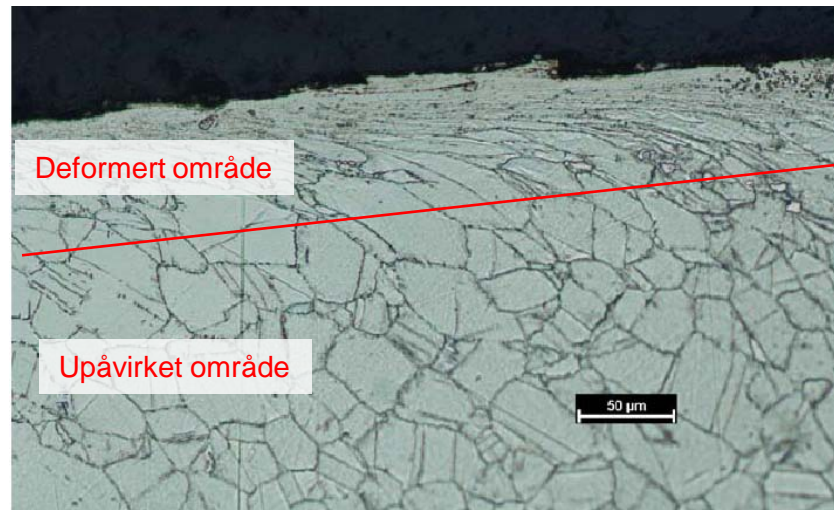
- Konklusjon:
 - VAN har fremdeles en stor oppside da de fremdeles kan øke produktivitet med 60 % uten at dette påvirker verktøylevetid.
 - VAN er opptatt av en sikker og stabil prosess, men standtiden kan økes fra dagens nivå.
 - Utfordringen ligger i en kraftig nok spindel.
 - Kostnadsbesparelsen blir da 50 og 58 % for henholdsvis 80 og 63mm fres.

Maskineringsforsøk hos VAN

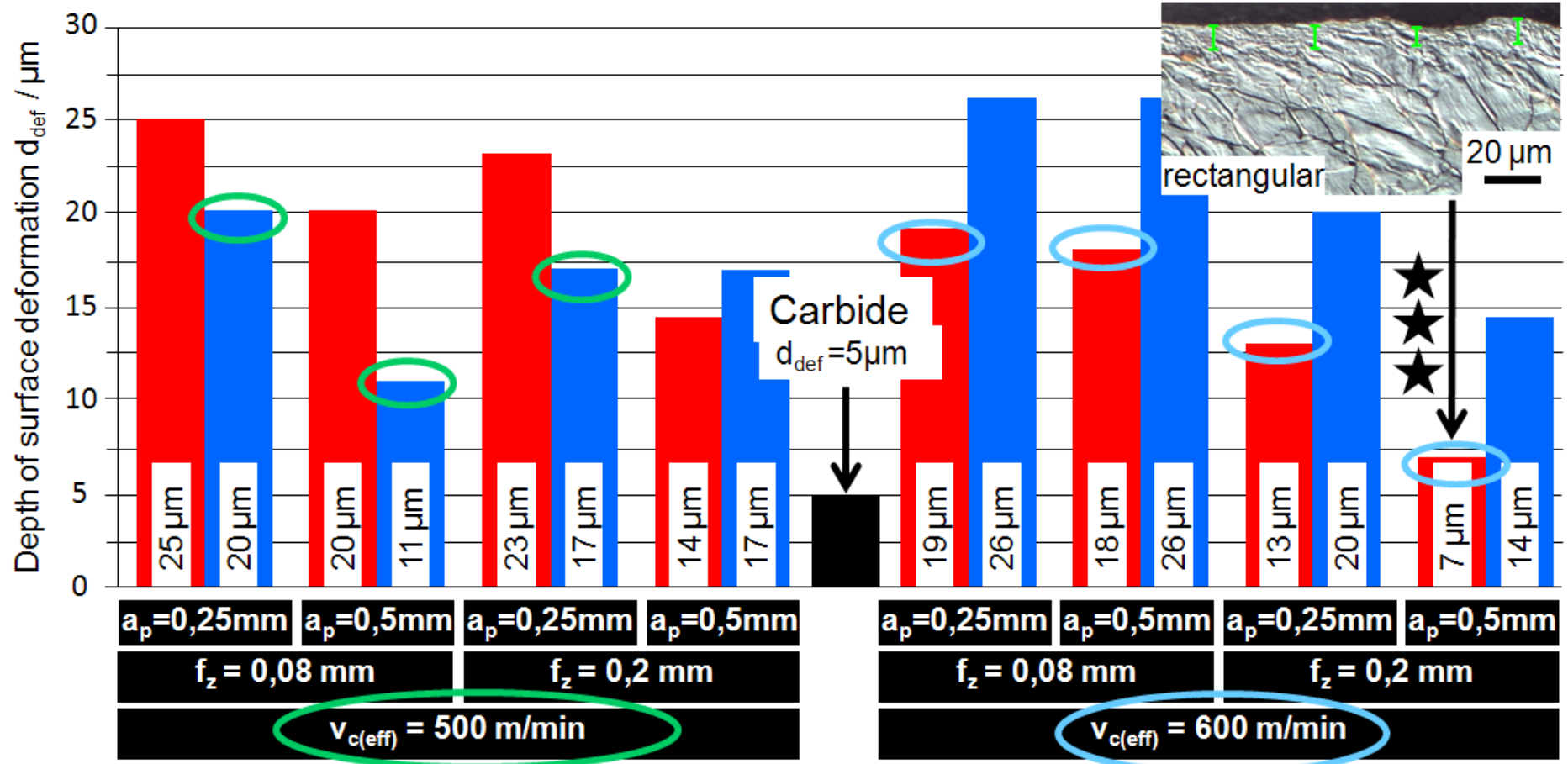


Overflatedeformasjon

- Et viktig begrep i flymotorbransjen
- Aggressiv material fjerning = negativ påvirkning av materialet?
 - Nja.... Ikke alltid.
- Produksjonsfolk ønsker raskest metode, kvalitetsfolk ønsker sikre metoder



Overflatedeformasjon



- ◆ $D_{insert} = 6,35 \text{ mm}$
- ◆ $D_{insert} = 12,7 \text{ mm}$

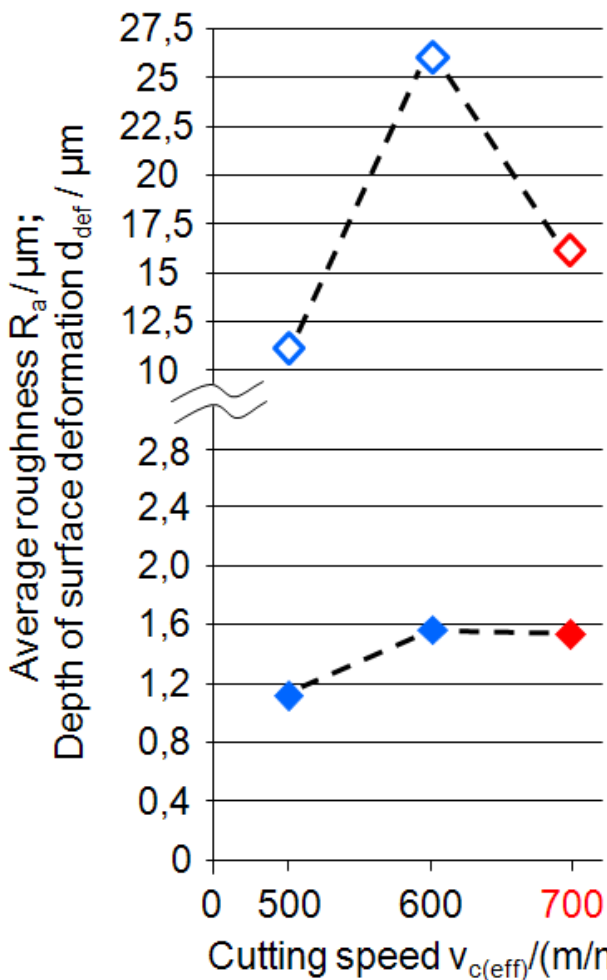
Process: Up milling with MQL

Material: Inconel 718

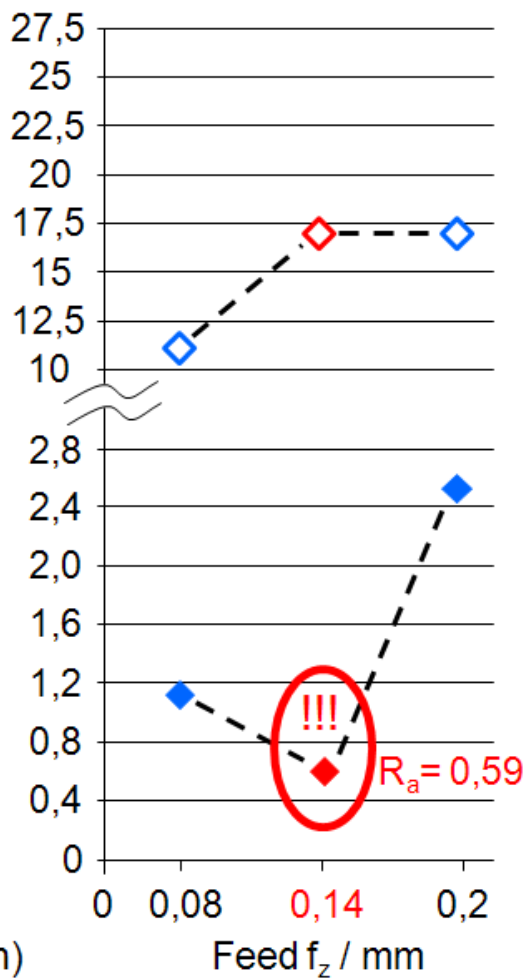
Miller: D = variable; z = 3

Inserts: SiAlON ceramic; positive-E-insert

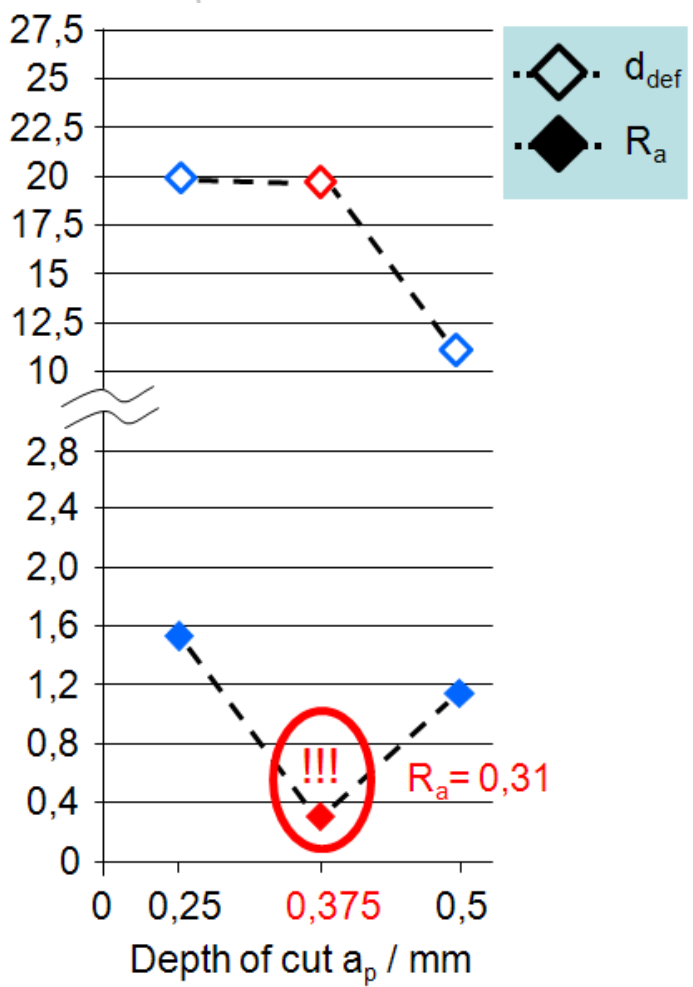
Overflatedeformasjon



$f_z = 0.08 \text{ mm};$
 $a_p = 0.5 \text{ mm};$



$v_{c(\text{eff})} = 500 \text{ m/min};$
 $a_p = 0.5 \text{ mm};$

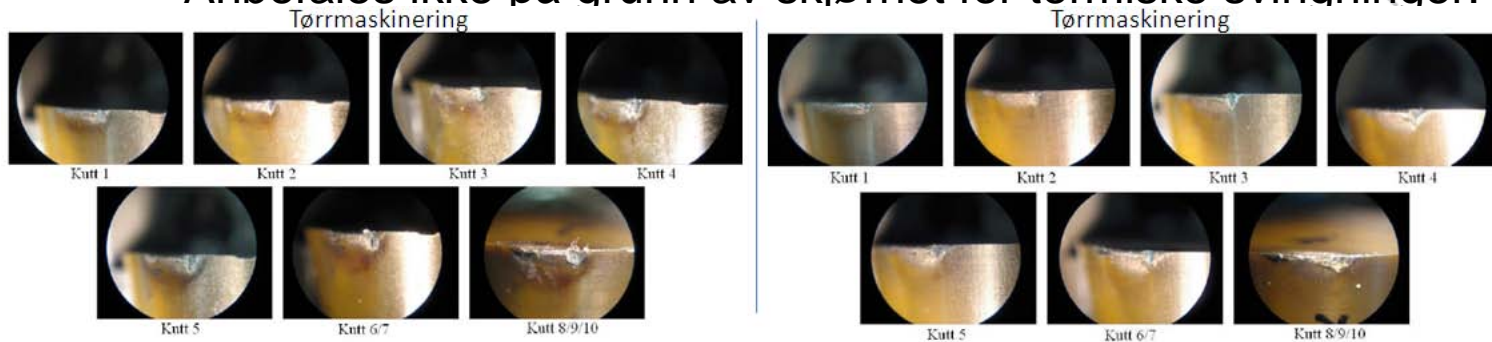


$v_{c(\text{eff})} = 500 \text{ m/min};$
 $f_z = 0.08 \text{ mm};$

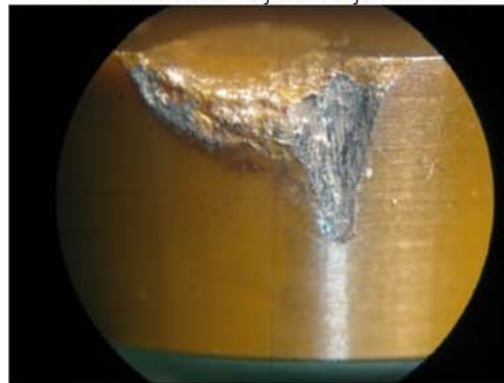
- \diamond d_{def}
- \blacklozenge R_a

Erfaringer med Keramikk

- Skjærevæske:
 - Anbefales ikke på grunn av skjørhet for termiske svingninger.



Bruk av konvensjonell skjærevæske



Hvor mange kutt tror dere dette skjæret stod?!

Erfaringer med Keramikk

- Spon:
 - Det blir meget finkornet og spisse spon, pga liten middelspontykkelse.



NTNU

Det skapende universitet

Erfaringer med Keramikk

- Stabil Prosess:
 - Keramiske skjær er skjøre for vibrasjoner, og man er avhengig av en meget solid oppspenning for å kunne dra nytte av de høyeste avvirkingshastighetene.



Erfaringer med Keramikk

- Krever bemannet operasjon
 - På grunn av fare for sprøbrudd, kreves det kontinuerlig overvåking av prosessen.
 - Maskinovervåking kan eliminere behovet for dette, slik at man kan kjøre ubemannet.

Råd til optimalisering

- Sørg for å ha identisk materiale som prosessen.
- Sørg for å ha identisk oppspenning/stabilitet som prosessen.
- Sørg for identiske kutt, for sammenlikning.
- Sørg for myk inngang/tilsvarende prosessens.
 - Vi tok alltid et lite kutt for å fjerne grader før vi begynte på hvert lag.



Råd til optimalisering

- Begynn litt under verktøyprodusents anbefalinger og øk skjærehastighet gradvis til man får uakseptable levetid (husk å ha "backup-skjær" som er slipt ned).
- Stopp på faste intervall for å måle verktøyslitasje, registrer så nøyaktig som mulig – uten å ta skjær ut av holderen.
- Vær obs på at fjerning av påsveist materiale kan dra med seg keramikk, og redusere verktøylevetid drastisk.



- Intern deksling er viktig. Spon trenger inn
- Sponfjerning må tenkes på, det kommer mye og fort. AutoSpyling av maskinrom
- Varmegang fra spon til maskin
- Spindelmoment vs RPM. Moment kreves ved høy RPM! Type spindel er avgjørende.
- Ikke spar penger på verktøyinnspenning. HSK100 etc.
- Plass i magasin, antall søsterverktøy
- Maskinovervåking? Kjøring med redusert bemanning?

- Kraftige holdere trengs
- Lite overheng er viktig
- Verktøyene kan ikke konkurrere med pinnefreser på størrelse. Reduserer tilgjengelighet på del.



- Lyd... over 100 desibel er målt hos VAN, inne i et annet rom.
- Vibrasjoner – føles i gulvet langt fra sponspikkingen

- **ALDRI** skjærevæske
- MQL – gir bedre overflatestruktur, men kan påvirke verktøyforbruk
- Luftblåsing er alltid fordelaktig
- Ingen kjøling er default.

Nålespon, ikke det beste å behandle i etterkant

- $V_c = 1000 - 1600$ (?) m/min
- $A_p =$

• Stabilitet!

- Bruk mest mulig identisk oppsett som produksjon
- Start noe under rekommandert
- Ikke nødvendigvis linjære sammenhenger, "sweet spots"
- Mål slitasje fortløpende
- Mye variasjon, en liten input kan ha stor effekt

Spørsmål?

- Takk for fremmøtet.