



FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

## FFI Hållbar framtagning av kuggtransmissioner



Redaktör Thomas Lundholm (KTH Industriell produktion)  
Bidrag från Uta Klement (Chalmers Material- och tillverknings teknik),  
Kumar Babu Surreddi (Chalmers Material- och tillverknings teknik),  
Ellen Bergseth (KTH Maskinkonstruktion),  
Mihai Nicolescu (KTH Industriell produktion),  
Mathias Werner (KTH Industriell produktion),  
Urban Wiklund (Uppsala universitet, Ångströmlaboratoriet),  
Julia Gerth (Uppsala universitet, Ångströmlaboratoriet),  
Jannica Heinrichs (Uppsala universitet, Ångströmlaboratoriet),  
Mats Larsson (Primateria AB), Mats Bagge (Scania CV AB)  
Material från Sören Sjöberg (AB Sandvik Coromant)

2012-12-28

Delprogram Hållbar produktionsteknik

## Innehåll

<b>1. Sammanfattning</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Bakgrund</b> .....	<b>4</b>
<b>3. Syfte</b> .....	<b>7</b>
<b>4. Genomförande</b> .....	<b>8</b>
<b>5. Resultat</b> .....	<b>9</b>
5.1 Bidrag till FFI-mål .....	9
<b>6. Spridning och publicering</b> .....	<b>22</b>
6.1 Kunskaps- och resultatspridning .....	22
6.2 Publikationer .....	22
<b>7. Slutsatser och fortsatt forskning</b> .....	<b>25</b>
<b>8. Deltagande parter och kontaktpersoner</b> .....	<b>25</b>

### Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings-, innovations- och utvecklingsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Säkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör hälften.

För närvarande finns fem delprogram Energi & miljö, Fordons- och trafiksäkerhet, Fordonsutveckling, Hållbar produktionsteknik och Transporteffektivitet. Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi)

## 1. Sammanfattning

Transmissionsprodukter är strategiskt viktiga nyckelkomponenter i drivlinor som produceras i den svenska fordonsindustrin. Ungefär på femtedel av den globala produktionen av transmissionsprodukter för tunga fordon sker i Sverige. För att möta de ökande miljö- och hållbarhetskraven är visionen för 2025 30% starkare och lättare fordonsväxellådor med nära 100% verkningsgrad och miljöanpassade smörjmedel och beläggningar. Detta kräver robusta konstruktions- och tillverkningsprocesser. Krav på låg kostnad, miljöpåverkan och energiförbrukning ökar och i projektet har en helhetssyn anlagts som beaktar alla viktiga faktorer rörande kuggtillverkning. Därför organiserades projektet i sex arbetspaket:

- WP1 Projektledning och resultatspridning
- WP2 Kugglivslängd och -effektivitet
- WP3 Kuggmaterial
- WP4 Robust konstruktion och tillverkning
- WP5 Skärverktyg
- WP6 Beredning

Viktiga uppnådda resultat är:

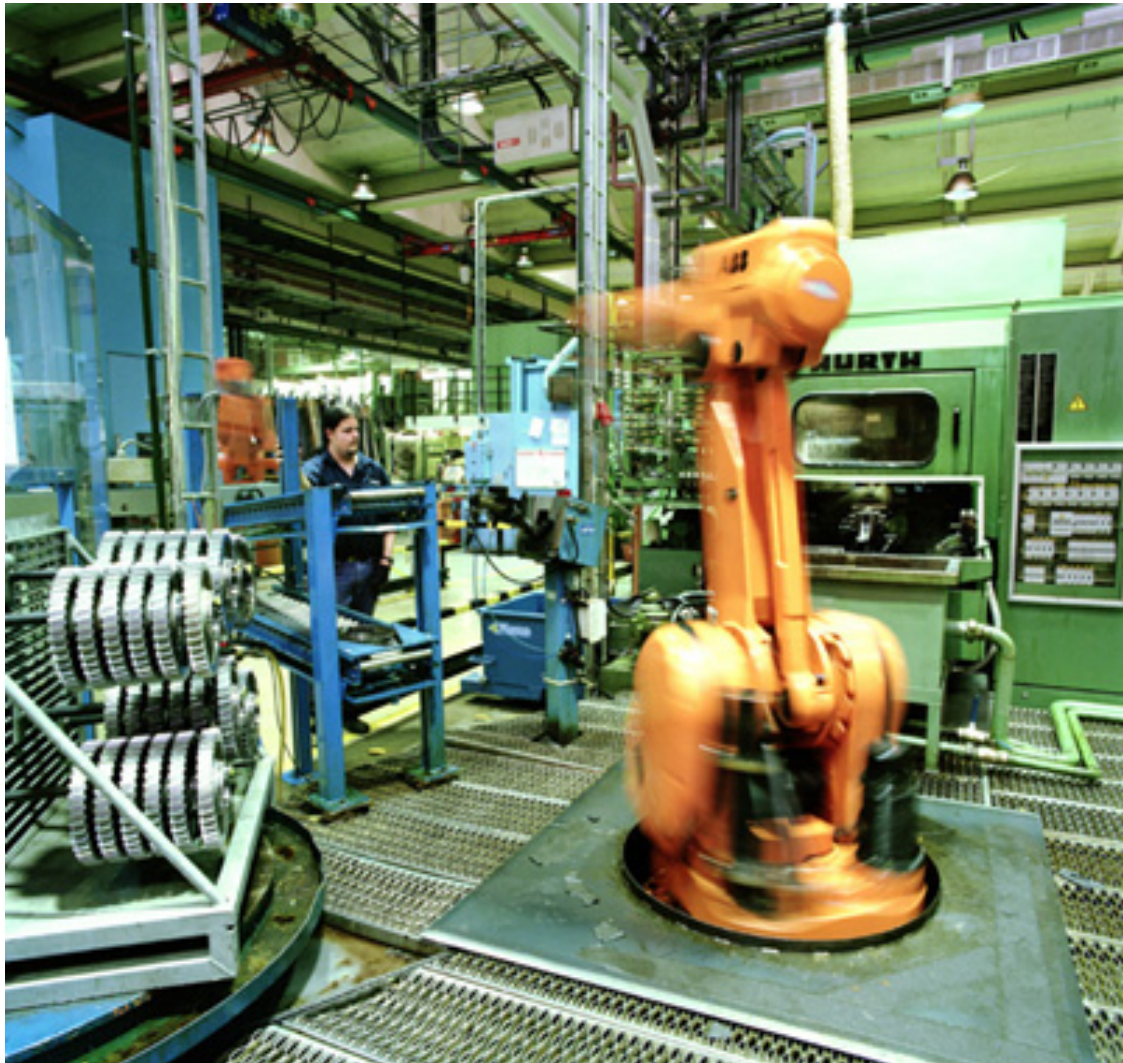
- Kuggflanker tillverkade med antingen hening eller skavning är att föredra framför slipning med avseende på inkörning och statisk bärförmåga.
- Polära skärbarhetsdiagram kan användas för att förstå variationerna i skärbarhet av sätthärtningsstål med olika mikrostrukturer.
- Variationen i yttopografi på grund av framställningsmetoden är en viktig faktor för kontakttillståndet för nya kugghjul.
- En 3-komponentsdynamometer för hobbning har utvecklats och är klar för test i produktionsmaskiner.
- De viktigaste förslitningsmekanismerna som observerades under experimenten med den utvecklade entandsfräsmetoden (STM) var grop- och fäsförslitning på primär- och sekundäreaggarna.
- Experimentella resultat visade att den del av hårdheten på en skärplatta med TiAlN-beläggning, förstärkt av tryckrestspänningar, var klart lägre vid skärkanten än på en plan yta.
- Materialpåkletningsexperiment visade att verktygsbeläggningarna förstördes på grund av bristande mekaniskt stöd vid hög glidhastighet, ibland beroende på att den genererade värmen orsakade termisk uppmjukning av substratet. AlCrN visade sig skydda något bättre mot termisk uppmjukning än traditionell TiN.
- Försöksplanering (DoF) visade sig vara en användbar metod för att undersöka den komplexa processen presshårdning. DoF i kombination med Monte Carlo-simulering är ett sätt att stödja beredning för djupare processkunskap och bra toleranssättning.

## 2. Bakgrund

I Sverige arbetar mer än 5000 personer med produktion av transmissioner och produktionsvärdet av dessa är cirka 12 miljarder kronor per år. Ungefär en femtedel av den globala produktionen av transmissionsprodukter för tunga fordon sker i Sverige med en stark koncentration i Mälardalen. Transmissionskomponenter har verkligen ett relativt högt förädlingsvärde, men kugghjullstillverkning är också en komplicerad verksamhet som kräver kostsamma investeringar. Svenska bilföretag har alltid varit duktiga på att konstruera och producera högkvalitativa kugghjulssystem internt, vilket återspeglas i att svenska kugghjullstillverkare har spelat stor roll för den internationella kugghjulsmarknaden. Idag bestämmer dock förmågan att möta nya krav, liksom hållbar teknik och miljöfokus, deras framtid i den allt mer konkurrenskraftiga marknaden.

Kugghjul används i nästan alla tillämpningar som kräver kraftöverföring. Ytterligare bevis på betydelsen av kugghjul och transmissionsdelar är att ungefär en fjärdedel av tillverkningskostnaden för personbilar och lastbilar är relaterat till transmissionskomponenter.

Medan prestandaförbättringar för kugghjul har planat ut under de senaste åren, pekar ny teknik på ännu större prestandaförbättringar. Dessa förbättringar går hand i hand med de övergripande ansträngningarna att uppnå en hållbar teknik eftersom de möjliggör bättre slitstyrka i mer kompakta växelpaket med försumbart driftbuller och nära 100% energieffektivitet.

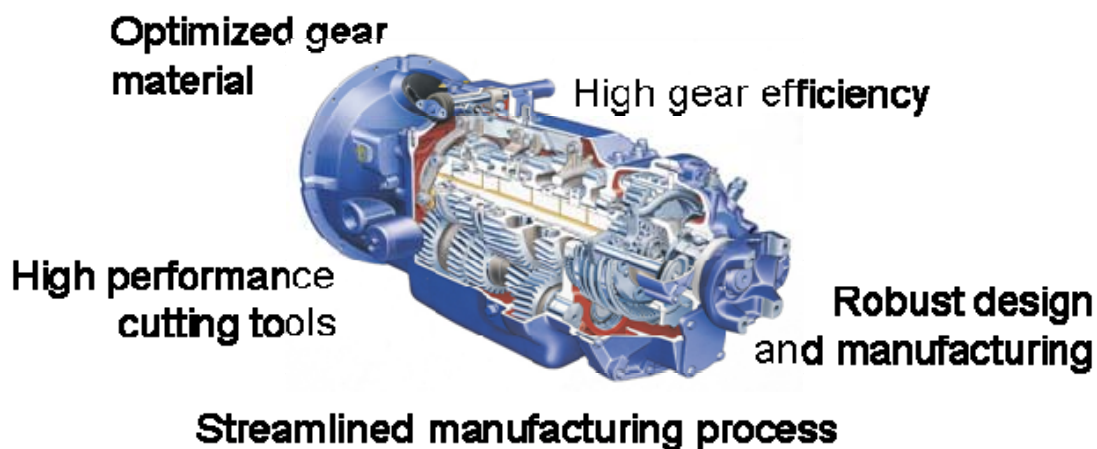


**Figur 1** Transmissionsverkstad på Scania.

För att möta de ökande miljö- och hållbarhetskraven, är visionen för år 2025 30% starkare och lättare fordonsväxellådor med nära 100% verkningsgrad som använder miljöanpassade smörjmedel och beläggningar. Detta kräver robusthet i konstruktion och tillverkningsprocesser.

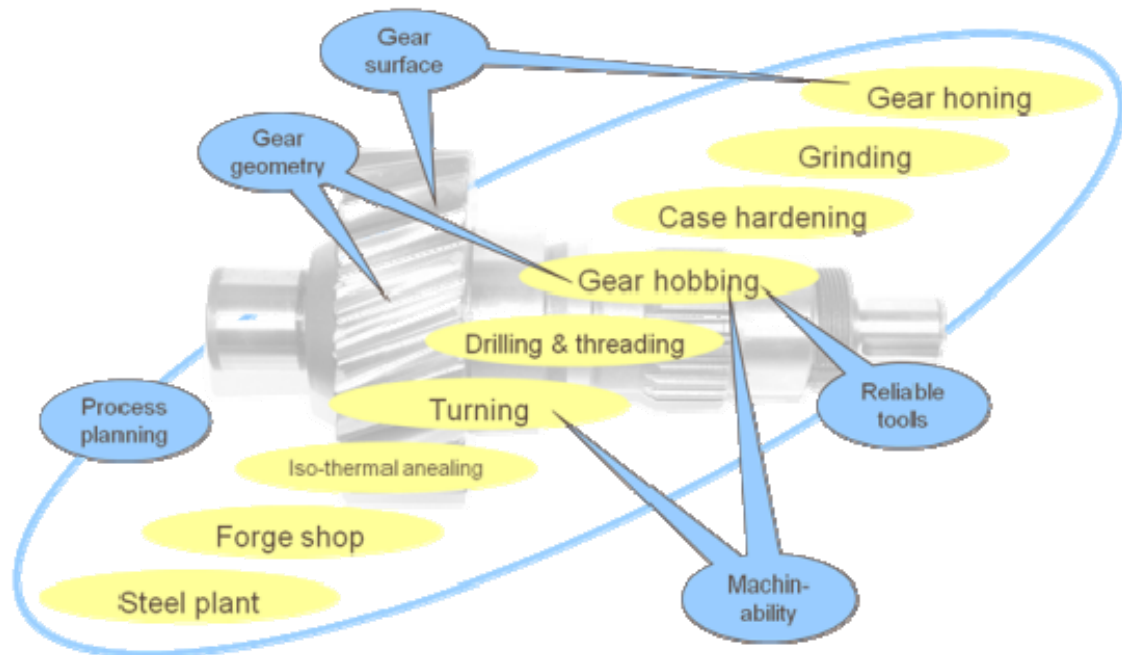
Kuggjul är utan tvekan bland de mest kritiska komponenterna i alla motorfordon. De kan, om de är korrekt konstruerade och tillverkade, arbeta med en mycket hög verkningsgrad och de kommer att förbli mycket viktiga delar i fordonstransmissioner, oavsett energikälla eller framdrivningsprincip.

Idag har den traditionella listan över krav rörande storlek, hållfasthet och fröslitningsmotstånd utvidgats till att även omfatta krav för tystare och robustare kugghjul. Ur tillverknings synpunkt, kräver de nya kraven förbättringar av produkten utan att öka tillverkningskostnaderna. Förmågan hos svenska kugghjulstillverkare att snabbt reagera på dessa trender och drivkrafter kommer att avgöra deras framgång eller misslyckande på den internationella arenan. Framgång kommer kräva ny teknik såsom innovativ kugghjuls konstruktion, förbättrade material, och framsteg inom tillverkning och automation. Ökat samarbete mellan kugghjuls konstruktörer, tillverkare, slutanvändare och den akademiska världen, med stöd från den svenska regeringen, accelererar och förbättrar effektiviteten av sådan teknikutveckling.



Figur 2 Framtida utmaningar i växelsystem förverkligande.

Framtagning av ett kugghjulssystem är en komplex process, inte bara med avseende på kugghjulsgeometrin, dess ytbehandling och smörjning, men också med tanke på de olika operationerna för produktion. Val av material och optimering på mikro- och makronivå är viktigt eftersom det ofta eftersträvas att göra kugghjul så små och kompakt som möjligt. Följaktligen kommer kugghjul att utsättas för höga mekaniska och termiska påfrestningar och för att klara dessa kan endast högkvalitativa material användas. Sådana material påverkar produktionsberedningen med avseende på diverse olika tillverkningsoperationer, inklusive manuella operationer, optimering av verktygseggar, val och optimering av verktygsbeläggningar, val av tillverkningsprocesser med verktygsmaskiner för hög precision och ekonomiska aspekter som kostnader och vinst som dessutom måste beaktas.



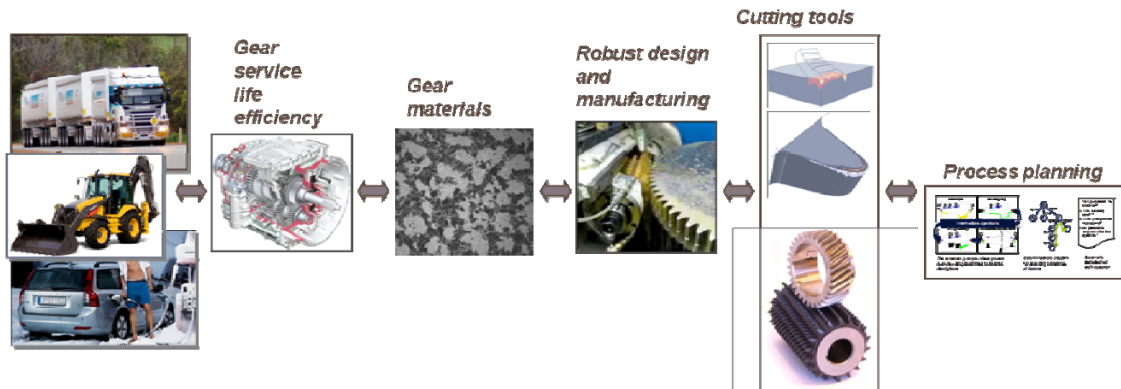
Figur 3 Komplexa processkedjor för kuggtillverkning.

### 3. Syfte

Projektet förväntades ge nya insikter på sambandet mellan kugghjulsprestanda, smörjmedelsformulering och energiförluster i växlar. Projektet skulle klargöra vad olika finbearbetningsprocesser kan ge avseende växeffektivitet. Vidare skulle det klargöra vilken typ av modifieringar av kuggytor som krävs vid användande av miljöanpassade smörjmedel i växellådor. Projektet skulle ta fram nya verktyg för produktionsberedning och riktlinjer för hur man kan uppnå robust kuggjulstillverkning. Samtidigt bör inflytande och påverkan på andra aspekter av tillverkningen förtydligas. Ny verktygskonstruktion och riktlinjer för materialval i verktyg samt kuggjul skulle utvecklas.

## 4. Genomförande

Krav på låg kostnad, miljöpåverkan och energiförbrukning ökar och projektet tar hänsyn till dessa krav genom att anta en holistisk ansats med alla tillverkningens kritiska moment i åtanke.



Figur 4 Holistisk ansats för kuggtillverkning.

Därför organiserades projektet i sex arbetspaket:

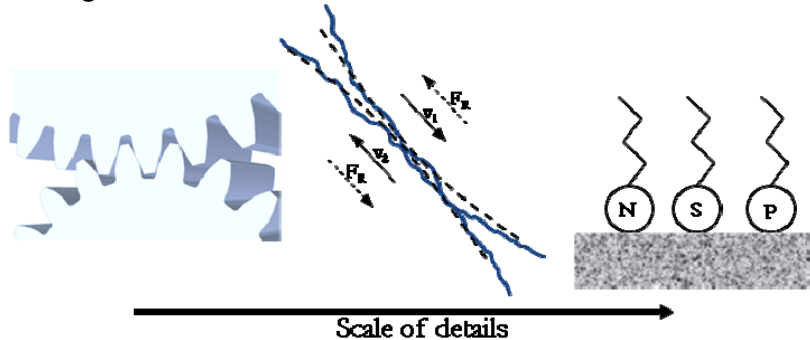
- WP1 Projektledning och resultatspridning
- WP2 Kugglivslängd och -effektivitet
- WP3 Kuggmaterial
- WP4 Robust konstruktion och tillverkning
- WP5 Skärverktyg
- WP6 Beredning





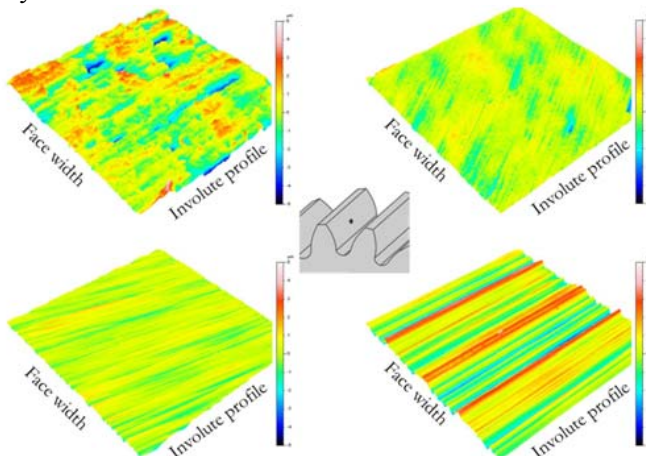
## WP 4 Robust konstruktion och tillverkning

Figur 7 ger en översikt av transmissionssystem i olika skalor: ett kugghjulspår i kontakt med varandra, en närbild av två kugghjulsytor i kontakt med varandra med avvikelser från en perfekt kugghjulsprofil och ytaktiva tillsatssämnen adsorberade med den polära änden på ett metallsubstrat. Detta arbetspaket täckte hela spektrumet, men med fokus på växellådstribologin i den lilla skalan.



Figur 7 Detaljskala för kontaktytorna på makro- till mikronivå och kontaktgränsskikt på nanonivå.

- Genom experimentellt arbete och datorsimuleringar har det visats att variationen i yttopografin naturligt förekommande i framställningsmetoden är en viktig faktor för kontakttillståndet i ett kugghjuls tidiga liv.
- Ett nålinstrument har använts för att mäta fyra kugghjul som tillverkas med hobbning, plungeskavning, hening, och genererande slipning. Ytanalys visade att bildningen och sammansättningen av ytskikten mestadels beror på den kemiska sammansättningen av smörjmedlet, men dessutom även på redan befintliga ytskikt. Dessutom spelar ytskiktet en viktig roll för friktionsbeteende, slitage och för att låta smörjmedlet att reagera ordentligt med ytorna.



Figur 8 Yttopografi för fyra vanligt förekommande tillverkningsmetoder. För 1 x 1 mm-områdena har formen tagits bort genom ett femte gradens 3D-polynom. Alla topografier har samma höjdskala: -5 till 5  $\mu\text{m}$ .

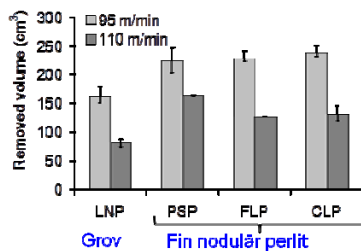
**Produktkrav i form av lägre vikt och ökad passiv säkerhet, vilket i sin tur kräver nya eller förbättrade material och tillverkningsprocesser möts.**

## WP3 Kuggmaterial

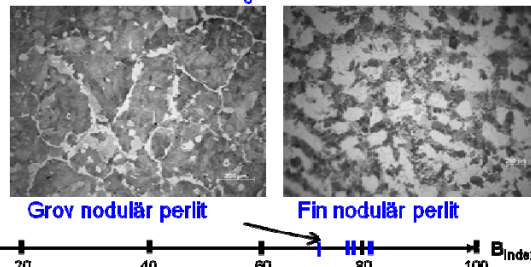
De huvudsakliga slutsatserna från studierna av skärbarhet för sätthärdningsstål är:

- Material med mindre perlitnodulstorlek uppvisar mindre verktygsslitage (högre  $B_{index}$ ) jämfört med grov nodulär perlit på grund av liten kornstorlek.
- Verktygsslitage påverkas mer av perlit nodulstorlek och perlitinnehåll än hårdhet och perlitmorfologi.
- Material med grov nodulär perlit (LNP) har en lägre kritisk matning som leder till mer segmenterade spånor och bättre spånbrytning.
- Mangansulfidinnestutningar (MnS) är bra och förbättrar spånbrytningen. Utfällningar som karbider är skadliga och måste styras med lämplig värmebehandling.
- Polära skärbarhetsdiagram kan användas för att förstå variationerna i skärbarhet för sätthärdningsstål med olika mikrostrukturer.

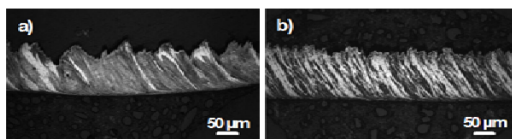
**Verktvagslitage:** Avverkad volym vid kritiskt verktygsslitage



Sätthärdningsstål-20MnCr5

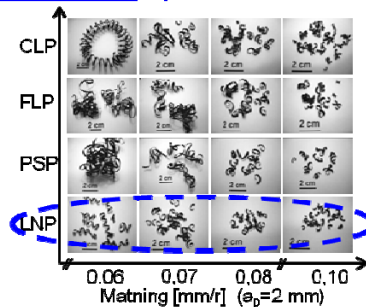


- Material med perlitnoduler av mindre storlek har bättre bearbetbarhet (högre  $B_{index}$ )
- Material med grövre perlitnodulstruktur (LNP) har lägre kritisk matning → mer segmenterade spånor → bättre spånbrytning



Grov nodulär perlit      Fin nodulär perlit

**Spånbrytning:** Spånor vid olika matningar



Figur 9 Sammanfattande slutsatser.

Rekommendationer:

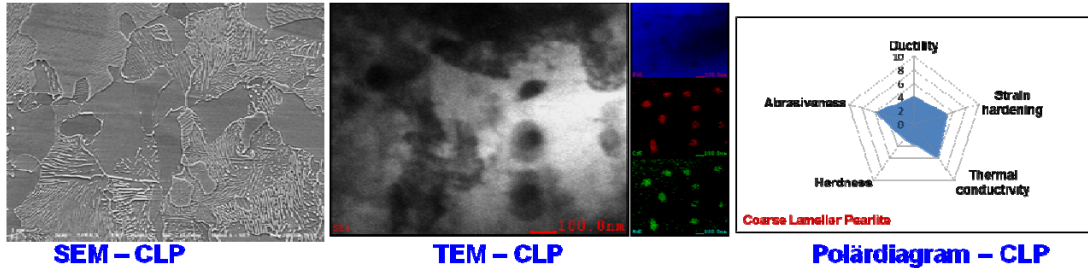
- Det är mycket viktigt att utföra kontrollerade och enhetliga värmebehandlingar före bearbetning av sätthärdningsstål.
- Mikrostrukturen måste vara väl utformad genom att beakta verktygsslitage och spånbrytning. Det betyder att det är väsentligt att erhålla en enhetlig mikrostruktur med optimerad kornstorlek och fasinnehåll.
- För bättre verktygsslitage och spånbrytning, bör det optimerade sätthärdningsstålet innehålla ungefär lika mängder av ferrit och perlit och ha stor kornstorlek (ca 50 till 100 µm). Därför är

det nödvändigt att välja rätt parametrar för värmebehandlingsprocesser såsom austenitiseringstemperaturen, hålltid och temperatur för att erhålla önskad mikrostruktur.

- Polära skärbarhetsdiagram kan användas för att jämföra och beskriva skärbarhet för olika mikrostrukturer.

#### Rekommendationer:

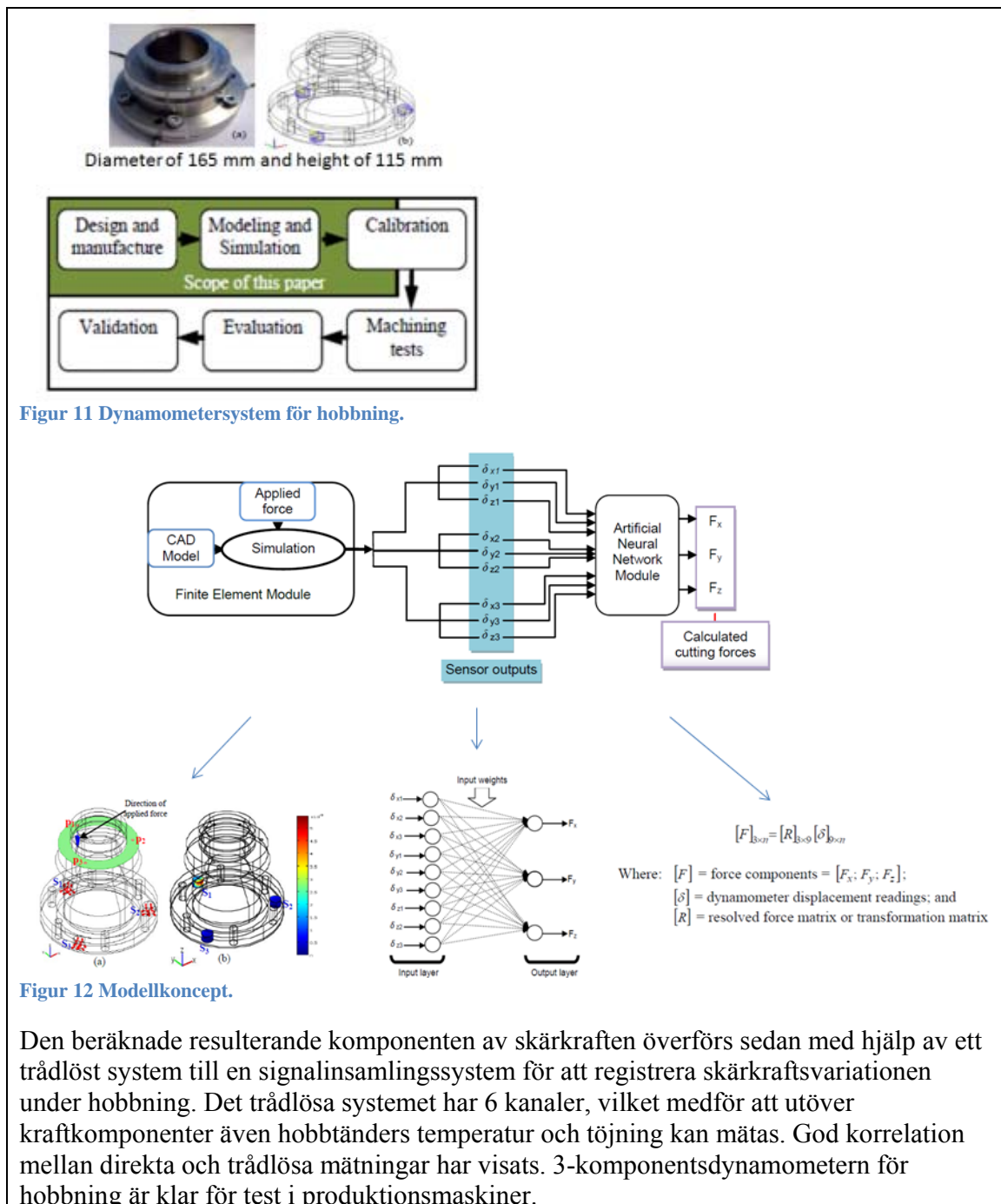
- Kontrollerad och jämn värmebehandling bör utföras.
- Mikrostruktur bör utformas med hänsyn till verktygsslitage och spånbrytning.
- Enhetlig mikrostruktur med optimerad kornstorlek och fasinnehåll är viktigt.
  - Grövre kornstorlek (~50 to 100 µm) med ungefär lika mängder av ferrit och perlit.
- Polärdiagram över bearbetbarhet kan användas för att förstå sambandet mellan mikrostruktur och skärbarhet.
- Optimerad värmebehandling bör utformas för att styra utfällningar.
  - Noggrant val av hålltid och temperatur under värmebehandling.

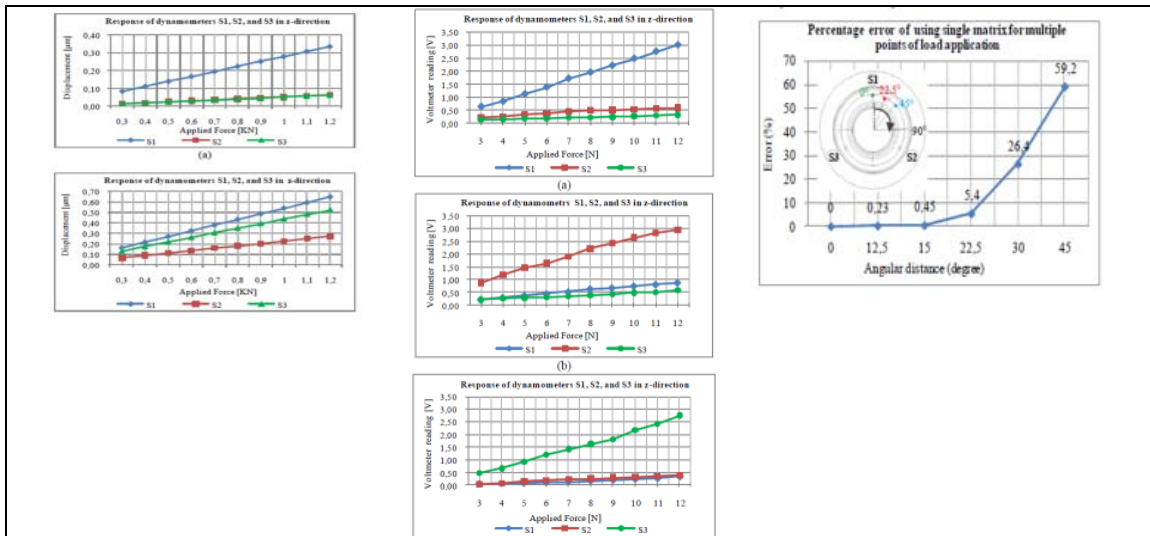


Figur 10 Illustration till rekommendationer.

#### WP4 Robust konstruktion och tillverkning

Vid framställning av högprecisionstransmissioner är det viktigt att identifiera effekterna av tillverkningsvariationer på kugghjuls funktionella krav. Tillverkningsvariationer kan bero på individuella maskinvariationer (orsakade av till exempel verktygsslitage), brist på styvhet hos arbetsstycket och val av tillverkningsmetod. Den mesta forskningen som gjorts om inflytande från tillverkningsvariationer på kugghjulsprestanda är ofta relaterat till de vanliga kugghjulparametrarna (t ex geometri), men inte hur olika tillverkningsprocesser påverkar andra egenskaper (t ex mikrostruktur hos material) för den färdiga produkten. Ett dynamometerfixtur för 3-komponentskraftgivare placerade med 120° delning på botten av fixturen har utvecklats. Arbetsstycket (kugghjulet) är inspönt i fixturen, som roterar samtidigt med fräsverktyget för att generera kuggarna.



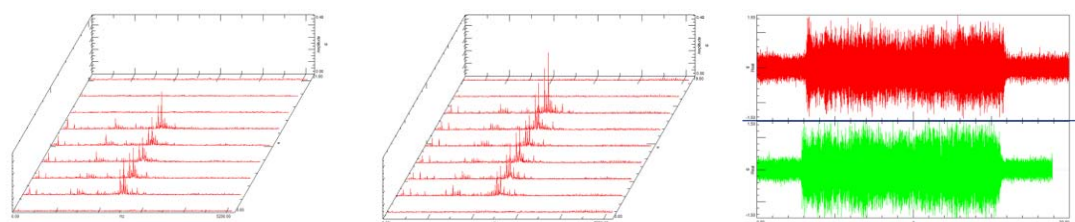


Figur 13 Simuleringsresultat (vänster), experimentella resultat (mitten) och kalibreringsfel (höger).

## 6 channel RFID system: strain gages, piezo sensors, temperature sensors



Figur 14 Systemkomponenterna.



Figur 15 Direkt mätning (vänster), trådlös mätning (mitten) och direkta (röda) och trådlösa (grön) mätningar (höger).

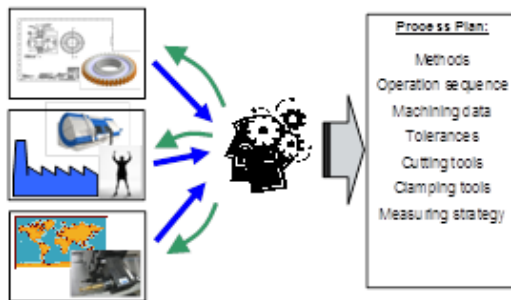
## 40% högre produktivitet i produktionsberedning.

### WP6 Produktionsberedning

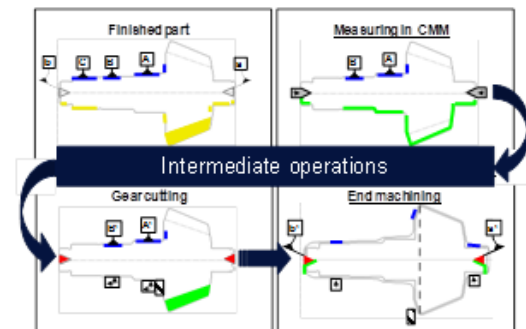
Kugghjulsproduktionen är ett område där produktionsberedning är mycket viktigt på grund av den nära kopplingen mellan kugghjulskonstruktion och tillverkningsmetoder. Kugghjulsgeometrier är förknippade med komplicerad kinematik för framställning. Bearbetnings- och mätmöjligheter definierar vad kugghjulskonstruktören har att arbeta

med. Den kompletta växeldelen (kugghjul, axel etc) tillverkas med både maskiner och verktyg som är speciellt utvecklade för kuggtillverkning, och standardmaskiner för vanliga metoder som svarvning, härdning och slipning. Det är en symbiotisk utveckling av kuggkonstruktions- och tillverkningsmetoder som syftar till att uppnå högpresterande kuggväxlar och effektiva processer. Detta skapar behov av verktyg för produktionsberedning och metoder som kan hantera karakteristika för produktion av transmissionsdelar.

Den roll en produktionsberedare har kan kortfattat beskrivas som en länk mellan konstruktion och tillverkning. Ansvaret som följer är att skapa och upprätthålla goda förbindelser för att utbyta och lösa tekniska problem rörande produktionen. Målet är att hitta lösningar som tillgodoser både konstruktionskrav och förutsättningar för en hållbar produktion. En produktionsberedare måste i detta avseende vara expert och bollplank gällande tillverkning (figur 16).



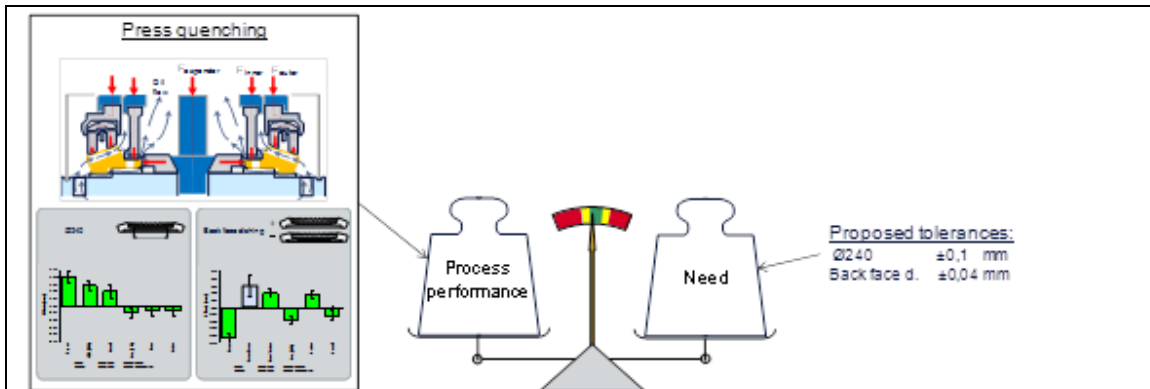
Figur 16 Interaktion för en produktionsberedare.



Figur 17 Ramverk för visuell representation av systematisk produktionsberedning.

Tillvägagångssättet för systematisk processplanering tidigare presenterat i MERA Kugg (figur 17) syftar till att stödja möjligheterna att strukturera, identifiera, granska och värdera information steg för steg och med en bra möjlighet till överblick. Det kommer också att främja enklare produktionsberedning när enstaka eller omfattande förändringar införs på en produkt eller i en tillverkningsprocess. Förutom möjligheterna att dokumentera tekniska resonemang kommer detta att vara ett sätt att beskriva produktionsberedningsarbetet. Innehållet i metoden härstammar huvudsakligen från produktionsberedningserfarenhet som sätts in i ett strukturerat sammanhang för att tillgodose syftet med denna forskning.

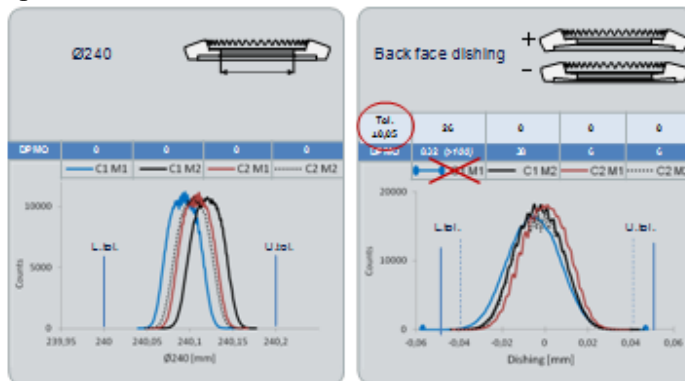
Tillvägagångssättet för systematisk produktionsberedning omfattade inte toleranser, där processbeteende och -förmåga balanseras mot behovet (figur 18). Det viktigaste arbetet i denna arbetspaket handlar om hur komplexa processer kan undersökas i syfte att definiera relevanta och välbalanserade toleranser.



Figur 18 Balansering av behov och processprestanda.

Metoden att ta reda på vilken styrbarhet och prestanda man kan få för en viss process är genom att använda försöksplanering (DoE). Resultaten från experiment som utförts med presshårdning visar hur ett par faktorer väsentligt påverkar både storleken och formen på vinkelväxeldetaljer. Dessa faktorer är av två typer; *kontrollerbar*, t ex tryckinställningar, och *okontrollerbar*, t ex materialet.

Resultaten från utvärderingen av experimenten inkluderar inte bara en regressionsmodell, som beskriver effekten av olika faktorer på storlek och form, utan dessutom mått på processvariationer. Genom att använda måtten på variationer i processen och tillämpa Monte Carlo-simuleringar på regressionsmodellen kan resultat från processen uppnås. Dessa uppskattningar kan göras för olika scenarier där kombinationer av maskininställningar, material och faktorinställningar testas. Slutligen definieras toleranserna genom att utvärdera hur väl de uppskattade resultaten uppfyller önskad kapacitet eller antal defekta delar.



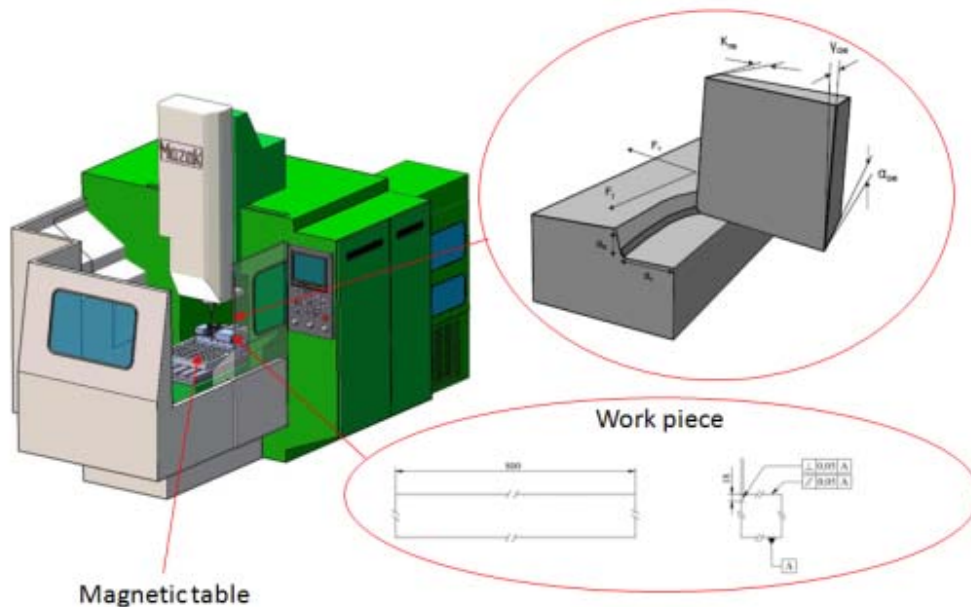
Figur 19 Beräknade resultat för presshårdningsprocessen i förhållande till föreslagna toleranser.

Försöksplanering har visat sig vara en lämplig metod vid undersökning av den komplexa processen vid presshårdning. Detta bevisas av förmågan hos regressionsmodeller för att förutsäga resultat för Ø240 och formförändring av underytan. Försöksplanering i kombination med Monte Carlo-simulering är ett sätt att stödja produktionsberedning för djupare processkunskap och god toleranssättning.



**30% högre produktivitet i produktionsprocesser.****WP5 Skärverktyg****Entandsfräsning (STM)**

Det är viktigt att ha god kontroll över defekter, i både beläggning, stålsubstrat liksom i gränssnittet mellan beläggningen och HSS-materialet för att nå hög tillförlitlighet hos verktyg. Skärgeometri och ytjämnhet före och efter beläggingsdeposition är avgörande faktorer för utveckling av slitage. Att använda hobbar för sådana studier medför höga produktionskostnader för verktyg, dyra maskinkostnader eftersom en kugghobningsmaskin krävs och tidskrävande slitagetester. Ett entandsfrästest (STM) kan användas för att reproducera förslitningsmekanismer på hobbar genom att använda lämpliga skärdata översatta till fräsoperationen.



Figur 20 Testinstallation för STM-metoden i en konventionell fleroperationsmaskin.

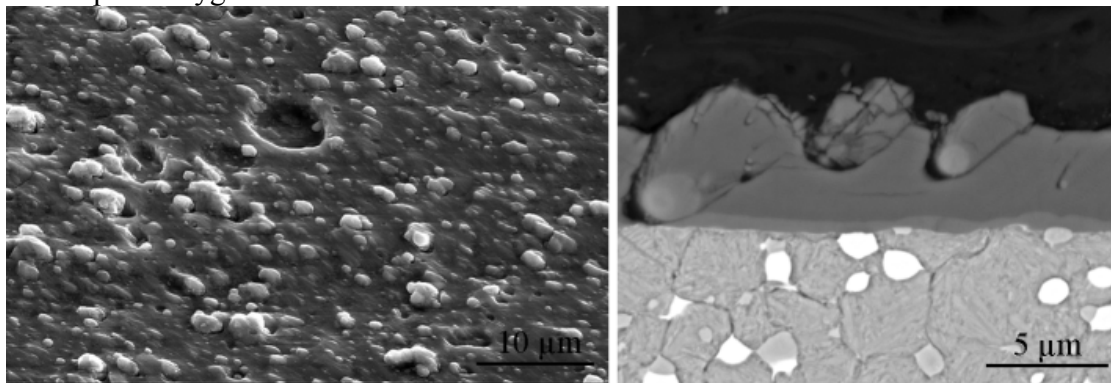
**Slutsatser:**

- De huvudsakliga förslitningsmekanismer som observerades under experimenten med STM var grop- och fäsförslitning på den primära, respektive sekundära eggen.
- Gällande släppningsytans slitage kan en trend urskiljas, se figur 21. Med ökad kantradie, blir storleken på släppningsytans slitage mindre på grund av den inre spänningen i tandbeläggningen, som uppenbarligen minskar i takt med en ökning av skäregegens radie. Volymförlusten i skärkanten är relaterad till kantradien, respektive ytfinheten.



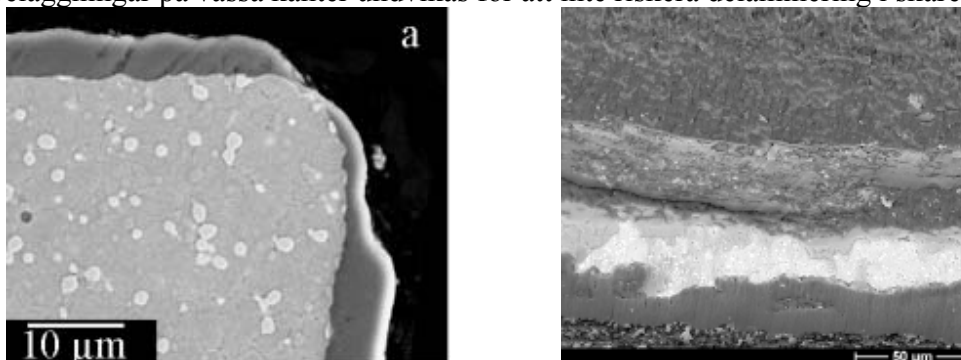
### Restspänning

Restspänning i beläggningar är en naturlig följd av depositionsprocessen som används för applicering av beläggningar på skärverktyg. För hobbar spelar kvalitet och egenskaper hos beläggningen stor roll för verktygets prestanda. Vissa PVD-processer ger beläggning av ytor som under mikroskop, som i figur 22, ses innehålla stora mängder droppar som kommer från depositionsprocessen. Dessa bör, om möjligt, undvikas eftersom de utgör svaga punkter i beläggningen där restspänning i beläggningen, och yttre belastning under bearbetning, kan orsaka lokala skador som växer från isolerad skada upp till omfattande skador på verktyget.



Figur 22 En nybelagd yta av en skärtand i planvy (vänster) och i tvärsnitt (höger).

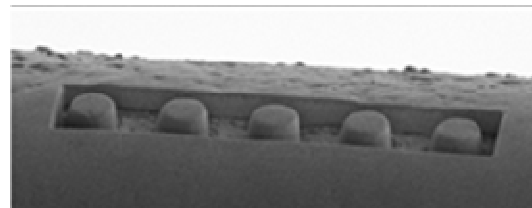
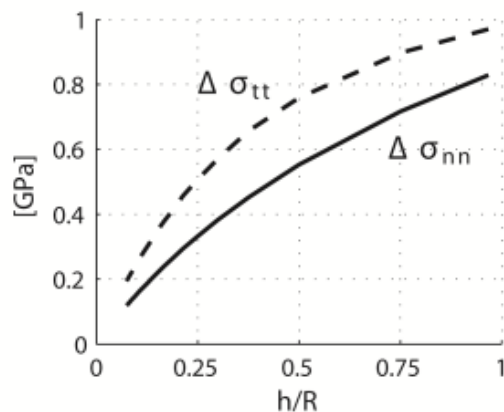
En annan belastningsrelaterad effekt är att tryckrestspänning inducerar lyftspänning vid skarpa kanter, t ex på skäreppgar. Dessa främjar delaminering vid kanten, redan under depositionen, efter kylning eller under skärning, se figur 23. Dessa lyftspänningar existerar inte på plana substratytor, men vid en kant ökar de i takt med att skärradien minskar, vilket visas i modellresultaten i figur 24 (vänster). En plan yta har oändlig radie och i det fallet blir  $H/R$  noll, vilket resulterar i  $\Delta\sigma_{nm} = 0$ , men samtidigt som radien ökar ökar lyftspänningen. Detta är modellerat för en TiAlN-beläggning med en nominell restspänning på -1,7 GPa som deponeras på HSS. Uppenbarligen måste tjocka beläggningar på vassa kanter undvikas för att inte riskera delaminering i skäreppen.



Figur 23 En oanvänd tand från en hobb i ett tvärsnitt som visar beläggningsskador i framkant (vänster) och en skärepp efter användning med omfattande slitage vid kanten, initierat eggurflisningar och gropförslitning vid spånnytan (höger).

Ytterligare en effekt som har sitt ursprung i restspänningen är den gynnsamma effekten av spänningsförhöjd kohesion i beläggningen, det vill säga den effekt som beläggningstillverkaren utnyttjar för att förbättra prestandan hos beläggningen. Denna effekt är inte fullt utvecklad precis vid skäreggen, eftersom kanten är något elastiskt relaxerad och den tryckrestpåkänningen är lokalt reducerad. Detta var också modellerat, liksom visat i figur 24 (vänster).  $\Delta\sigma_{tt}$  ökar, det vill säga spänningen parallell med gränsytan reduceras, eftersom  $H/R$ -förhållandet ökas. Av samma anledning bör tjocka beläggningar och skarpa kanter undvikas om den gynnsamma effekten av "artificiell" kohesion ska användas.

Restspänningen på en skäregg kan inte mätas direkt med den annars vanliga metoden röntgendiffraktion. Istället illustrerades effekten med en metod där hårdhet används som ett indikativ mått på restspänning. En kommersiell skärplatta med TiAlN-beläggning, med en restspänning på -1,7 GPa, användes. Hårdheten hos spänningsfri pelare, se figur 24 (höger), jämfördes med hårdhet av en närliggande nydeponerad beläggning. På en plan yta var reducering av hårdhet på grund av de spänningsfria pelarna 2,6 GPa, medan reduceringen vid skäreggen endast var 1,6 GPa. Detta visar att den del av hårdheten, förstärkt av tryckrestspänningar, var klart lägre vid kanten än på en plan yta.



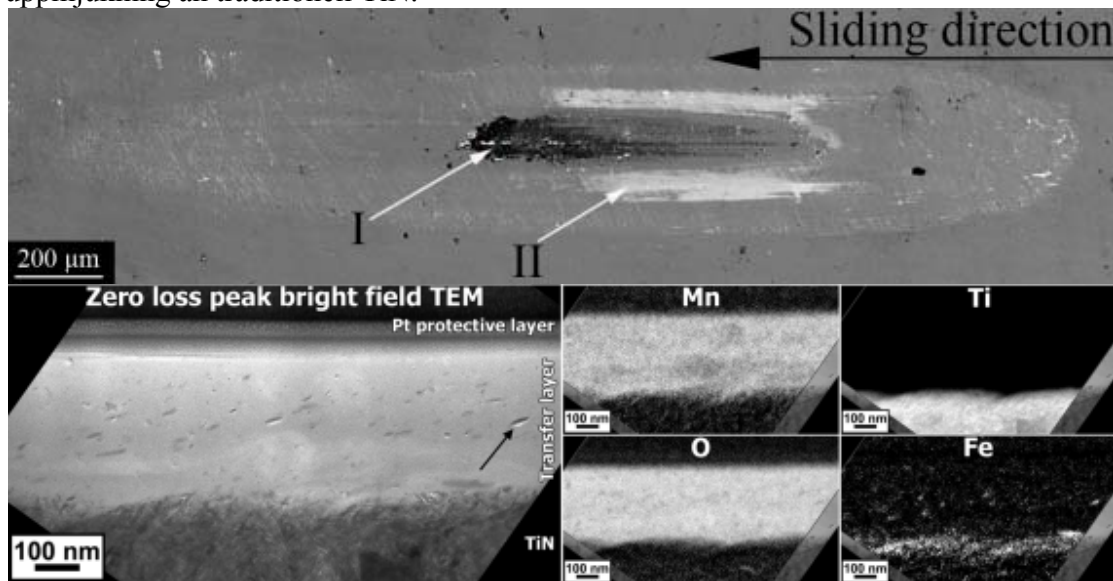
Figur 24 Modellerade eggeffekter på restspänningar i en beläggning med en plan restspänning på -1,7 GPa (vänster). Spänningsfria pelare i framkant användes för att illustrera lokalt reducerad restspänning precis på skäreggen (höger).

### Materialpåkletning

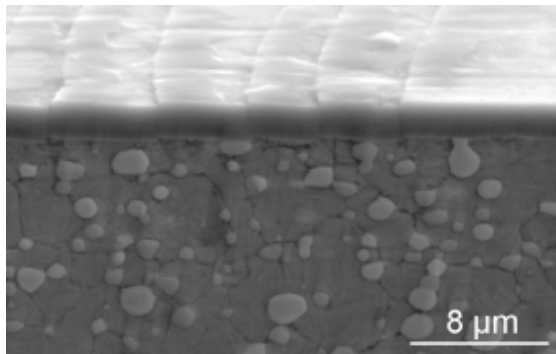
Det är väl känt att material överförs från arbetsmaterialet till verktygets yta vid skärande bearbetning, och att det påverkar skäreggens geometri, skademekanismer för skärverktyget, liksom ytkvaliteten hos den bearbetade komponenten. Mängden påkletning, och egenskaperna hos det påkletade materialet, beror på skärdata, arbetsmaterialet och själva verktyget. Av denna anledning är studier av den ursprungliga materialpåkletningen till olika beläggningar viktiga.

Cylindrar med olika beläggningar och olika ytjämnhet testades vid olika glidhastighet för att undersöka den ursprungliga materialpåkletningen från arbetsmaterialet till verktygets yta. Det visade sig att materialpåkletningen var oberoende av beläggningsmaterialet.

Även friktionskoefficienten var mycket lik. Vid låga glidhastigheter överfördes stål i ett oxiderat tillstånd över hela kontakten. Vid måttlig glidhastighet utvecklade den centrala delen av kontakten, som har högst temperatur och tryck, ett skikt bestående av Al, Si och Mn i oxiderad form, se figur 25. Längre ut från mitten av kontakten överfördes stål i ett oxiderat tillstånd. Vid hög glidhastighet havererade belägningarna på grund av bristande mekaniskt stöd, se figur 26, ibland eftersom den genererade värmen orsakade termisk uppmjukning av substratet. AlCrN visade sig skydda något bättre mot termisk uppmjukning än traditionell TiN.



Figur 25 Översikt över kontakten på den TiN-belagda cylindern som har glidit mot sätthärtningsstål (överst). Tvärsnitt genom det påkletade centrala skiktet med Mn och O som exemplifierar oxidhalten ovanpå ett initialt påklett järnrikt skikt (botten).



Figur 26 Hög belastning på TiN-beläggning orsakade plastisk deformation av substratet och genomgående sprickbildning i beläggningen.

## 6. Spridning och publicering

### 6.1 Kunskaps- och resultatspridning

En effektiv och uppskattad aktivitet för resultatspridning har varit de återkommande kuggmötena, ett arv från MERA KUGG-projektet. Kuggmötena var planerade enligt följande:

- Dag 1 sen eftermiddag och kväll: styrgruppsmöte följt av en kuggmiddag.
- Dag 2 morgon och tidig eftermiddag: kuggmöte i plenum med presentationer från forskarna i projektet, och partnerföretag samt inbjudna talare från både svenska och internationella forskningsorganisationer och företag.
- Dag 2 eftermiddag: verkstads- eller labbesök.

Traditionen med kuggmöten betraktas som en viktig aktivitet för nätverk samt för kunskaps- och erfarenhetsöverföring och kommer att upprätthållas i det pågående FFI SMART-projektet. Den plenardelen är öppen även för deltagare som inte är involverade i projektet.

### 6.2 Publikationer

Bagge, M, 2009, An approach for systematic process planning of gear transmission parts, licentiate thesis, KTH Royal Institute of Technology, TRITA-IIP, ISSN 1650-1888; 09-01, Stockholm.

Bergseth, E, Björklund, S, 2009, Logarithmical crowning for spur gears, submitted to Journal of mechanical engineering special issue for ECOTRIB 2009 and presented at ECOTRIB 2009 2nd European conference on tribology, June 7-10, Pisa.

Bergseth, E, 2009, Influence of surface topography and lubricant design in gear contacts, licentiate thesis, KTH Royal Institute of Technology, TRITA-MMK 2009:18, Stockholm.

Björkeborn, K, Klement, U, Lenander, A, 2009, Study of machinability of case hardening steel in production environment, Proceedings of the Swedish Production Symposium – 2009.

Gerth, J, Larsson, M, Wiklund, U, Riddar, F, Hogmark, S, 2009, On the wear of PVD-coated HSS hobs in dry gear cutting, Wear 266 (3-4), pp 444-452.

Gerth, J, Werner, M, Larsson, M, Wiklund, U, 2009, Reproducing wear mechanisms in gear hobbing – Evaluation of a single insert milling test, Wear 267 (12), pp 2257-2268.



FORDONSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

Sjöberg, S, Sundh, J, 2009, Scuffing resistance of gear surfaces influence of manganese phosphate and lubricants, submitted to Journal of mechanical engineering special issue for ECOTRIB 2009 and presented at ECOTRIB 2009 2nd European conference on tribology, June 7-10 2009, Pisa.

Werner, M, 2009, Investigation on HSS milling inserts, licentiate thesis, KTH Royal Institute of Technology, TRITA-IIP, ISSN 1650-1888; 09-03, Stockholm.

Bergseth, E, Björklund, S, 2010, Logarithmical crowning for spur gears, Journal of Mechanical Engineering 56 (2010) 4.

Bergseth E, Olofsson U, Lewis R, Lewis S, 2010, Effect of gear surface and lubricant interaction on mild wear, Presented at Tribology Congress in Australia ASIATRIB 2010, 5-9 December 2010, Perth, Western Australia (konferensbidrag), inskickat till Tribology Letters.

Björkeborn, K, Klement, U, Oskarson, H-B, 2010, Study of microstructural influences on machinability of case hardening steel, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 49 (2010) 441-446.

Gerth, J, Larsson, M, Wiklund, U, 2010, Examination and classification of damage mechanisms on PVD coated HSS hobs used in Swedish gear manufacturing industry, Submitted to Tribologia, 2010.

Nyberg, H, Gerth, J, Olofsson, J, Wiklund, U, Jacobson, S, 2010, On the influence from micro topography on the structure and growth of low friction amorphous carbon PVD coatings, PSE 2010, Garmisch Partenkirchen, September 13-17, 2010.

Sjöberg, S, 2010, On the running-in of gears, licentiate thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm.

Alazar, S A, Werner, M, Nicolescu, C M, 2011, Development of cutting force measurement system for gear hobbing, Proceedings of the ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE 2011, August 28-31, 2011, Washington, DC, USA, DETC2011-48121.

Gerth, J, Larsson, M, Wiklund, U, 2011, Survey of damage mechanisms on PVD coated HSS hobs in Swedish gear manufacturing industry, Tribologia 30 (1-2), pp 37-50.

Sjöberg, S, Olofsson, U, Björklund, S, 2011, The influence of manufacturing method on the running-in of gears, Journal of Engineering Tribology, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J, DOI: 10.1177/1350650111414471.



FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

Didner, N, 2011, The running-in behaviour of gear surfaces with influence of manganese phosphate, master of science thesis MMK 2011:37 MKN 048, KTH Royal Institute of Technology, Machine Design, SE-100 44 Stockholm.

Bagge, M, Lindberg, B, 2012, Analysis of process parameters during press quenching of bevel gear parts, Swedish Production Symposium, Nov 6-8, 2012, Linköping, Sweden.

Bergseth E, Olofsson U, Lewis R, Lewis S, 2012, Effect of gear surface and lubricant interaction on mild wear, Tribology Letters, article in press, DOI: 10.1007/s11249-012-0004-y.

Bergseth E, Sjöberg S, Björklund S, 2012, Influence of real surface topography on the contact area ratio in differently manufactured spur gears, Tribology International, 56 (2012) 72–80.

Gerth, J, Heinrichs, J, Nyberg, H, Larsson, M, Wiklund, U, 2012, Evaluation of an intermittent sliding test for reproducing work material transfer in milling operations, Tribology International, Volume 52, August 2012, Pages 153–160.

Heinrichs, J, 2012, On transfer of work material to tools, dissertation, Uppsala universitet, ISBN: 978-91-554-8261-9.

Gerth, J, Heinrichs, J, Nyberg, H, Larsson, M, Wiklund, U, 2012, Evaluation of an intermittent sliding test for reproducing work material transfer in milling operations, Tribology International 52, pp 153-160.

Heinrichs, J, Gerth, J, Bexell, U, Larsson, M, Wiklund, U, 2012, Influence from surface roughness on steel transfer to PVD tool coatings in continuous and intermittent sliding contacts, Tribology International 56, pp 9-18.

Heinrichs, J, Gerth, J, Thersleff, T, Bexell, U, Larsson, M, Wiklund, U, 2012, Influence of sliding speed on modes of material transfer as steel slides against PVD tool coatings, accepted, Tribology International

Nakhjiri, M, Study of running-in on spiral bevel gears, master of science thesis, KTH Royal Institute of Technology, Machine Design, SE-100 44 Stockholm.

Surreddi, K B, Björkborn, K, Klement, U, Microstructural characterization of chips of case hardening steels, in manuscript.

Surreddi, K B, Klement, U, Methodology for evaluating the machinability of case hardening steel by using polar diagrams, in manuscript.

Surreddi, K B, Yao, Y, Klement, U, Microstructural studies of case hardening steel and their chips, in manuscript.



## 7. Slutsatser och fortsatt forskning

Den kunskap och de erfarenheter som erhållits från projekt parallellt med nya industriella krav har lagt grunden för att formulera nya utmaningar i växel tillverkning. Således är tre viktiga och industriellt relevanta forskningsfrågor adresserade och kommer behandlas i det nya projektet FFI Hållbar tillverkning av framtida transmissionsdelar – SMART:

- kuggrullning
- bearbetning av rena stål
- formförändring vid härdning.

## 8. Deltagande parter och kontaktpersoner



Projektpartnerna är listade nedan.

Akademiska: Kungliga Tekniska högskolan, Chalmers och Ångströmlaboratoriet (Uppsala universitet)

Fordonsindustri: Scania och Volvo

Underleverantörer till fordonsindustrin (Fordonskomponentgruppen, FKG): Componenta Wirso, GKN Drivline Köping, Ionbond, Leax, Ovako Hofors och SwePart Transmission

Övriga bolag: Albin Components, Erasteel Kloster, Höganäs, Meritor HVS, Oerlikon Balzers, Sandvik Coromant och SVA

Projektledare: Thomas Lundholm, KTH Industriell produktion,  
[thomas.lundholm@iip.kth.se](mailto:thomas.lundholm@iip.kth.se), +4687906381