

Kompakta och energieffektiva transmissioner - Styrning och prediktering av funktionsytans beteende



Författare: Mats Henriksson, Ulf Olofsson, Lennart Johansson, Mats Norell,
Lars Nyborg
Datum: 2018-04-16
Projekt inom FFI Hållbar produktion

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VIRNOVA

Energisystemhuset

TRAFIKVERKET

FMG
off Road

STREETS

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	3
3 Bakgrund.....	4
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	4
5 Mål	5
6 Resultat och måluppfyllelse	6
7 Spridning och publicering	11
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	11
7.2 Publikationer.....	11
8 Slutsatser och fortsatt forskning	12
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	13

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Transmissioner är och har varit ett nyckelsystem för svensk fordonsindustri, där man har behållit både utveckling, konstruktion, forskning och även produktion kvar i Sverige. Även om framdrivningssystemet för fordonet ändras till ett rent elektriskt system med elektriska motorer så har studier tydligt visat att vikten på elmotorerna drastiskt kan reduceras genom att kombinera dem med kuggväxlar. Kugghjulens yttopografi och ytskiktets egenskaper som skapas vid tillverkningen har stor betydelse för ytans påverkan under inkörningen. En potential att reducera friktionsförlusterna med 30 % med rätt tillverkad och inkörd yttopografi efter inkörning har tidigare visats. Mot bakgrund av dessa lovande resultat fanns det anledning styra forskningen mer mot själva utformningen av produktytan och koppla detta till dess beteende i samband med inkörning. Detta projekt har utvecklat simuleringsmetodik för inkörningssimulering av transmissioner med given form, yttopografi och ytstruktur, för mer robust och bättre prediktering av verkningsgrad och livslängd av kuggkontakter i växellådor.

En FZG-provrigg för verkningsgradsstudier som har modifierats för att möjliggöra in situ-mätning av yttopografi och kugghjulstemperatur användes i projektet. Här har också en utvärderingsmetodik utvecklats för att särskilja yttopografi från formfel och kuggprofil. En simuleringsmetodik har också utvecklats, där yttopografins nötning på kuggytor kan predikteras. Denna simuleringsmetodik används som underlag för vidare utveckling hur yttopografi och form påverkar ytintegriteten hos kuggtransmissioner. Kugghjulens ytor förändras och utvecklas på flera sätt vid initial belastning, inkörning och fortsatt belastning. Asperiteter på ytan plasticeras och parallella band bildas i mikrostrukturen inom några mikrometer under ytan. Dessa band har kunnat kopplas till sprickbildning och initiering av micropits. Projektet har genom experimentell utvärdering och karakterisering utvärderat potentialen att använda rätt yttexturering, t.ex. hening, och genom rätt inkörning få mest gynnsamma egenskaper för en kuggväxel i transmissioner för tunga fordon.

2 Executive summary in English

Transmissions have been a key system for the Swedish automotive industry, which has maintained both development, construction, research and also production in Sweden. Even if the propulsion system of the vehicle is transformed into an electrical system with electric motors, studies have clearly shown that the weight of the electric motors can be drastically reduced by combining them with gear gears. The gears surface and surface properties that are created during manufacture are of major importance for surface durability during operation. A potential to reduce friction loss by 30% with properly manufactured and in-use surface topography after running has previously been shown. In view of these promising results, there was reason to steer the research more towards the design of the manufactured surface itself and link it to its behaviour in connection with the running-in. This project has developed simulation methodology for simulation of geared transmissions with given shape, surface topography and surface structure, for more robust and better prediction of the efficiency and life of gear contacts in gearboxes.

The overall objective of the project was to:

- Develop simulation methodology for drive simulation of transmissions with given shape, surface topography and surface structure, - for more robust and better prediction of the efficiency and life of gear contacts in gearboxes.
- Through experimental evaluation and characterization, support and verify the developed simulation technology
- Through experimental evaluation and characterization, further verifying the potential of using the correct surface texture, e.g. honing, and right-handed gear in heavy-duty transmissions.

An FZG trial for efficiency studies that have been modified to enable in situ measurement of surface topography and gear temperature was used in the project. Here, an evaluation methodology has also been developed to distinguish surface topography from form errors and teeth profile. A simulation methodology has also been developed, where surface topography and wear can be predicted on the surfaces. This simulation methodology is used as a basis for further development, how surface topography and shape affect surface integrity of gear transmissions. The gears surface changes and develops in several ways at initial load, run-in and still loads. Asperities on the surface are plasticized and parallel bands are formed in the microstructure within a few microns below the surface. These bands have been linked to cracking and initiation of micropits. Through the experimental evaluation and characterization, the project has evaluated the potential for using the correct surface texture, for example honing and by proper operation, get the most favourable characteristics of a gearbox in heavy vehicle transmissions.

3 Bakgrund

I Sverige arbetar mer än 5000 personer med produktion av artiklar för fordonstransmissioner och produktvärdet är runt 12 miljarder SEK per år. Av tillverkningskostnaden för lastbilar är ungefär en femtedel relaterad till transmissionen som består av kuggghjul, axlar, kopplingar mm. Transmissioner är och har varit ett nyckelsystem för svensk fordonsindustri, där man har behållit både utveckling, konstruktion, forskning och även produktion kvar i Sverige. Även om framdrivningssystemet för fordonet ändras till ett rent elektriskt system med elektriska motorer så har studier tydligt visat att vikten på elmotorerna drastiskt kan reduceras genom att kombinera dem med kuggväxlar. Verkningsgraden för kuggväxlar är bättre än för de flesta andra energiomvandlare. Trots detta finns det fortfarande en förbättringspotential. Effektförlust i transmissioner kan indelas i lastberoende och hastighetsberoende förluster. Lastberoende förluster har i huvudsak sin uppkomst i friktion och glidning mellan ytor i kontakt, främst kuggflanker, men även i lager. Utformning och storlek på kuggarna spelar roll, liksom även smörjning och ytornas beskaffenhet. De lastberoende förlusterna påverkas i stor grad av ytans egenskaper i form av yttopografi och ytkemi. Dessa parametrar sätts via de avslutande stegen inom tillverkningen. Både ytans topografi och kemi påverkas under en transmissions livslängd sedan i hög grad av transmissionens inkörning. Ett av de tidigaste arbetena på kuggtransmissioners inkörning var presenterade av Andersson [1]. Metodiken här var oljeanalys kombinerat med resultat för yttopografien. I dag kan man inte prediktera yttopografins eller ytskiktets egenskaper samt sammansättning på de kuggghjul som används i inkörda transmissioner. Studier genomförda inom FFI-projekten "Hållbar framtagning av kuggtransmissioner och "Simulering, prediktering och optimering av inkörningsförlopp i kuggtransmissioner" visar att yttopografien och ytskiktets egenskaper som skapas vid tillverkningen har stor betydelse för ytans påverkan under inkörningen och därmed även verkningsgraden för de inkörda komponenterna [2], [3] [4]. Resultaten visar på en potential att reducera friktionsförlusterna med 30 % med rätt tillverkad och inkörd yttopografi och detta utan att arbeta med ytans kemi som medger en ytterligare besparingspotential. Resultaten visar på en potential för rätt bearbetade ytor tillsammans med rätt inkörning eventuellt kan ersätta inkörningsskikt som t.ex. fosfatering.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Yttopografien och ytskiktets egenskaper som skapas vid tillverkningen har stor betydelse för ytans påverkan under inkörningen. En potential att reducera friktionsförlusterna med 30 % med rätt tillverkad och inkörd yttopografi efter inkörning har tidigare visats. Mot bakgrund av dessa lovande resultat fanns det anledning styra forskningen mer mot själva utformningen av produktytan och koppla detta till dess beteende i samband med inkörning. Detta åstadkommes i projektet dels genom framtagning av ett simuleringsverktyg för prediktering av produktytans

inledande beteende vid inkörning och dels genom att fördjupa studierna kring möjligheterna att styra kuggytans egenskaper mot optimalt beteende via tillverkningen. En FZG-provrigg för verkningsgradsstudier som har modifierats för att möjliggöra in situ-mätning av yttopografi och kugghjulstemperatur användes i projektet. Här har också en utvärderingsmetodik utvecklats för att särskilja yttopografi från formfel och kuggprofil. En simuleringsmetodik har också utvecklats, där yttopografins nötning på kuggytan kan predikteras. Denna simuleringsmetodik används som underlag för vidare utveckling hur yttopografi och form påverkar ytintegriteten hos kuggtransmissioner. Riggtestade prover från KTH har tidigare använts för utveckling av metodik och kunskap vid Chalmers när det gäller karakterisering av ytegenskaper och materialpåverkan under inkörning. Denna har kombinerat uppmätning av restspänningar i ytan med mikrostrukturundersökningar med elektronmikroskopi samt kartläggning av ytkemi med ytspektroskopi. Både restspänningar satta under tillverkningen och yttopografien förändras under inkörningen och ytegenskaperna förväntas därmed också ha stor inverkan på materialförändringarna i ytan. Metodik för att i detalj kartlägga restspänningsfördelningen över kuggytan har involverat röntgendifraktionsmätningar av töjningen i kristallstrukturen. Speciellt har elektrokemiska etsningen förfinats vilket ger mycket hög precision i djupled. För att i mer detalj förstå materialförändringarna i ytan har samarbete med DTU inletts där högupplösande transmissionselektronmikroskopi kunnat tillföras. Ett särskilt kortvarigt projekt inom programmet INTERREG har också initierats för att undersöka möjligheterna till mer detaljerade restspänningsmätningar med synkrotronröntgen. Dessa metoder är viktiga att tillföra eftersom ytpåverkan vid de inkörningsförlopp som studerats är mycket grund, maximalt ca 10 µm. Inom detta djup påverkas både struktur och restspänningar tydligt.

Vidare har tillämpning av ytkemisk analys mha XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) utvecklats för att kartlägga om/hur oljeadditiv reagerar och binder till ytan vid inkörningen. Sammantaget skapar projektet därmed en grund inom transmissionsutveckling genom att ny experimentell utvärderingsmetodik kopplas direkt till och stödjer simuleringen och den experimentella provningen. Speciellt har arbetet påvisat i vilken grad materialförändringar av betydelse för den tribologiska kontakten kan förväntas ske lokalt på en transmissionsyta. Denna utvecklade karakteriseringsmetodiken används för att jämföra olika tillverkningstekniker och inkörningsförlopp för att vidare utveckla koppling mellan modellering och experiment på kuggkontaktnivå och yt- och materialkarakterisering på lokal nivå. Riggtestade prover från KTH har kompletterats med FZG provning i samarbete med Scania från 200 till $2,6 \cdot 10^7$ cykler för att följa hur materialförändringarna utvecklas från initiering till haveri.

5 Mål

Det övergripande målet med projektet var att:

- Utveckla simuleringsmetodik för inkörningssimulering av transmissioner med given form, yttopografi och ytstruktur, för mer robust och bättre prediktering av verkningsgrad och livslängd av kuggkontakter i växellådor.
- Genom experimentell utvärdering och karakterisering understödja och verifiera den utvecklade simuleringsmetodiken
- Genom experimentell utvärdering och karakterisering vidare verifiera potentialen att använda rätt yttexturering, t.ex. hening, och rätt inkörda kugghjul i transmissioner för tunga fordon.

Projektet bidrar till övergripande mål inom FFI-Hållbar Produktion inom området 5.1 när det gäller: "Nya produkter med hög livscykeffektivitet" med koppling till önskade förmågor när det gäller "Kompetens avseende tillverkning av elektrifierade drivlinor" genom ökad kompetens inom "Funktionella ytor", Vidare bidrar projektet till "Specifika tillverkningsmetoder för vissa material" samt "Nya produktionsmetoder" för befintliga material genom ny kunskaps avseende slutbearbetning av kuggkomponenter. Dessutom bidrar projektet till området 5.4 "Kvalitet" genom simuleringsteknik och kunskap som bidrar till "Verifiering av egenskaper som matchar

verkligheten". Projektet innebär vidare att bryggan mellan produktionsutveckling och produktutveckling stärks enligt följande med framtida potentiella produktoptimering som följd. I projektet, P35557-1, har det uppvisats en signifikant inverkan av inkörningen på verkningsgraden för kuggväxlar. Denna potential behöver utvecklas vidare med hänsyn tagen till olika tillverkningsmetoder och yttexturer. Detta leder direkt till en minskad bränsleförbrukning men ger också lägre kylbehov av växellådan vilket kan leda till minskade förluster i kylsystemet då pump- och kylarkapacitet kan reduceras. Som resultat kommer ökad kunskap kring optimering av ytintegritet hos kuggkomponenter såväl som andra rullande och glidande kontakter att etableras.

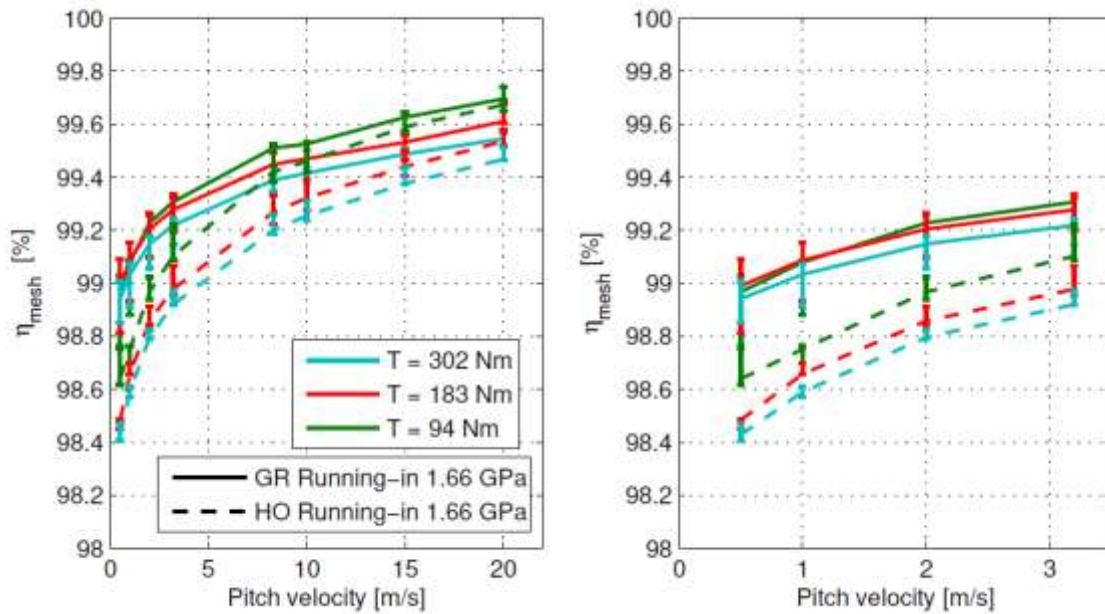
En stor bränslebesparingspotential finns genom att sänka motorns driftvarvtal, så kallad downspeeding. Detta leder till högre moment i drivlinan för att få samma drivkraft och därmed högre belastning på växellådan. Vidare medför lägre rotationshastighet på kugghjulen en sämre smörjfilmsuppbyggnad, något som leder till att mer last bärs av ytans asperiter. Därmed ökar påkänningen på ytan vilket riskerar att reducera livslängden. Detta projekt bidrar till att öka förståelsen för hur utformning och kuggkomponentens ytintegritet samverkar med förlopp under inkörningen. Detta bidrar till att skapa en robust yta som kan hantera större påfrestningar och medge en potential att ersätta fosfatering eller andra ytbehandlingsmetoder. En reduktion av oljans viskositet sänker de hastighetsberoende förlusterna men har benägenhet att öka de lastberoende förlusterna samt påverka kuggens ythållfasthet negativt. Detta projekt bidrar även i denna till en ökad förståelse för hur en robust yta skapas vid tillverkningen och hur ytan sedan påverkas under inkörningen och därmed bäst förbereder ytan för lång livslängd och hög verkningsgrad. Det vetenskapliga målet med projektet är två doktorsavhandlingar och 4-6 artiklar/konferensbidrag.

6 Resultat och måluppfyllelse

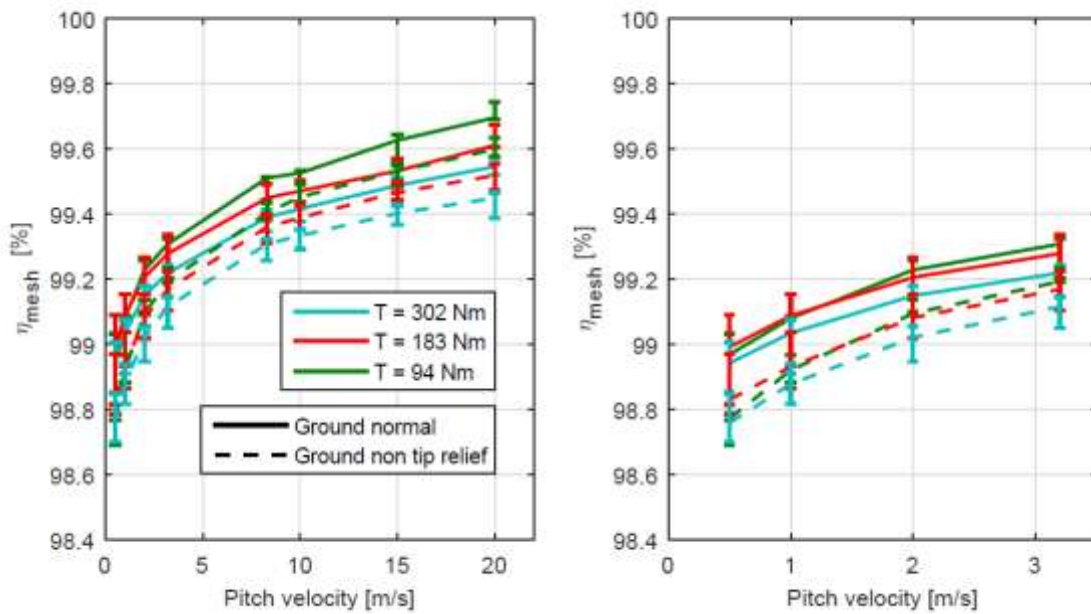
Inom ramen för projektet har två doktorander (Sosa, Mallipeddi) bedrivit forskarstudier. Projektet har resulterat i en doktorsavhandling (Sosa) och en licentiatuppsats (Mallipeddi). En ytterligare doktorsavhandling (Mallipeddi) är planerat till september 2018.

I projektet har inverkan av olika ytillstånd på prestanda hos kuggkomponenter varit ett centralt tema. Försökmatrisen har därmed innefattat jämförelse av kugghjul i slipat, henat och polerat tillstånd.

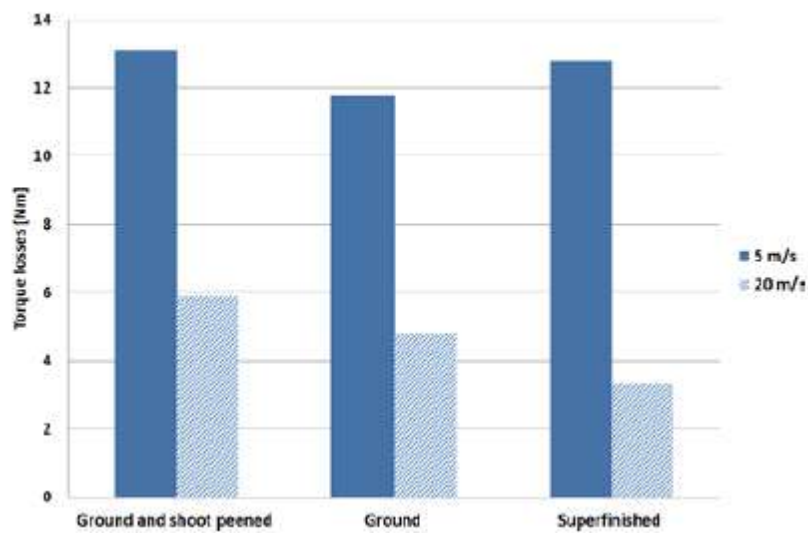
De experimentella studierna på kugghjul tillverkade med hening visar på en verkningsgrad som ligger något sämre än tidigare provserier med slipade och polerade kuggytor, se Figur 1. En jämförelse hur kvalitetsklassificering av formavvikelse enligt DIN 3962, visar att en användning av kugghjul med en formfelskvalificering enligt ISO mellan klass 6 och 9 har samma inverkan på reproducerbarheten för verkningsgraden som att montera isär och sätta ihop samma kuggväxel igen. Specifika formavvikelse, som toppavlättning eller inte, kan dock påverka verkningsgraden mer, se Figur 2. En jämförelse mellan dagens industristandard med kulbomberade kuggslipade ytor och polerade kuggytor visar på en potentiell friktionsreducering på upp mot 40 % vid icke gränsskiktssmorda drifförhållanden (20 m/s), vid 5 m/s som representerar gränsskiktssmorda förhållanden är skillnaden inte uppenbar, se Figur 3. För att prediktera inkörning utvecklades en simuleringsmetod. Metodiken bestod av att tillämpa en 2D ytintegralmetod för att simulera kontakt mellan ojämna ytor, men den kräver ythårdhet och korrekt undre cut-off-våglängd. Resultaten visar att cut-off-våglängden har stor inverkan vid bestämning av lokala kontaktryck, som är direkt kopplade till den verkliga kontaktarean, Den predikerade och uppmätta inkörda ytan visar god överensstämmelse för slipade kuggytor. Metodiken har också utvecklats vidare för att simulera hur formändringar under inkörning och drift på formfelnivå påverkar kontaktrycksfördelningen i kuggkontakten under ett ingrepp.



Figur 1 . Kuggkontaktens verkningsgrad, jämförelse mellan henade och slipade kuggjul.

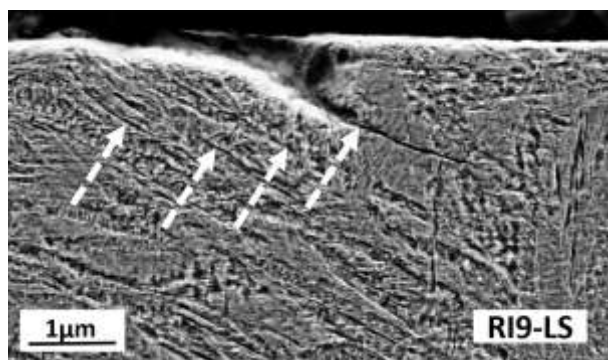


Figur 2. Kuggkontaktens verkningsgrad, jämförelse mellan toppavlättade och icke toppavlättade slipade kuggjul.



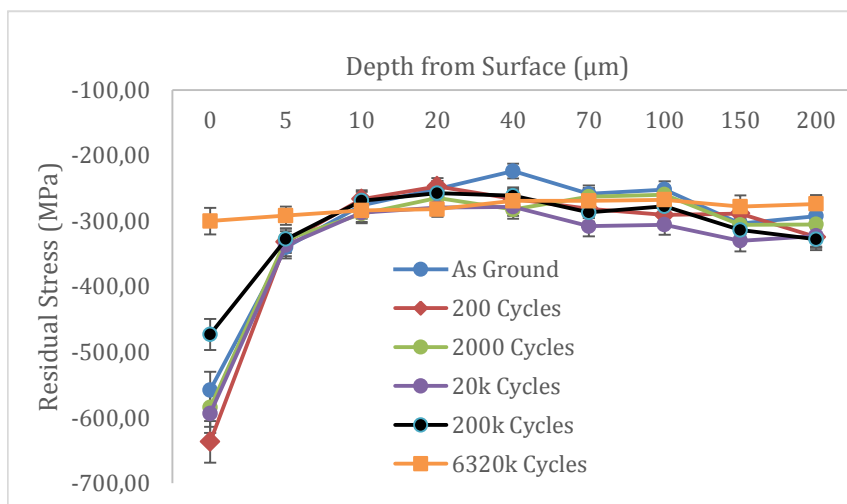
Figur 3. Förlustmomentjämförelse för slipade, slipade och kulbomberade samt polerade kugghjulspår.

Kugghjulens ytor förändras och utvecklas på flera sätt vid initial belastning, inkörning och fortsatt belastning. Asperiteter på ytan plasticeras och parallella band bildas i mikrostrukturen inom några mikrometer under ytan. Dessa band har kunnat kopplas till sprickbildning och initiering av micropits (Fig. 4). En detaljerad undersökning med transmissionselektronmikroskop har visat att banden bildas genom plastisk deformation av martensit kopplat med en förändring av dislokationstätheten. En studie av inflytandet av last och hastighet vid inkörning av slipade kugghjul visar att bildande av deformationsbanden och relaxation av restspänningar ökade med ökande last. Det samma gäller bildandet av den fosforinnehållande tribofilmen som visats med XPS-analyser. Däremot ökade bildandet av micropits mer med rotationshastigheten.



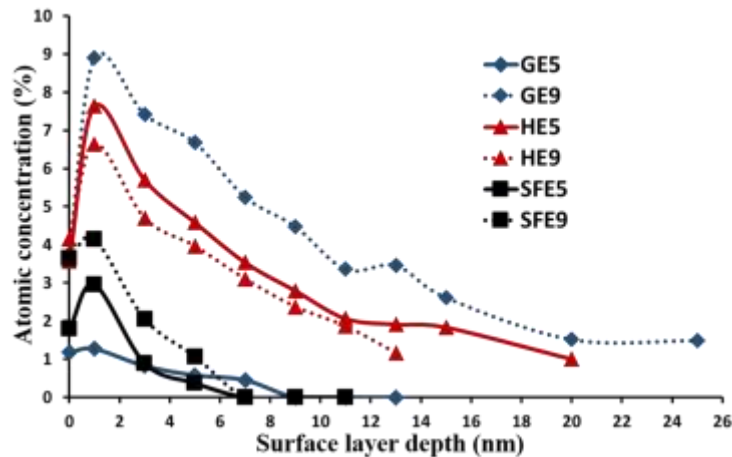
Figur 4. Deformationsband och sprickbildning efter inkörning med hög last och låg hastighet

Provning av slipade kugghjul i FZG-rigg i har visat att deformationsbanden och sprickor i ytan börjar uppträda redan efter 2000 cykler. Figur 5 sammanfattar hur tryckrestspänningar utvecklas, exemplifierat i profilens riktning vid dedendum. De ökade redan vid det kortaste provet med 200 cykler, för att sedan gradvis relaxeras upp till $6 \cdot 10^6$ cykler.



Figur 5. Djupprofiler av restspänningar i profilens riktning vid dedendum.

Materialförändringarna efter inkörning vid olika last och verkningsgradprovning har undersökts för de slipade, henade och polerade kugghjulen. Analyserna visar att tillverkningsmetoden har relativt stor inverkan på materialet i kugghjulets yta, både efter tillverkningen och hur det förändras vid provning. De polerade hjulen har en slätare yta, nästan helt utan asperiteter som ger lägre skjuvspänning i kontaktpunkterna. Efter sätthårdning är tryckrestspänningarna 200 MPa. Hening ökar dem till ca 1000 MPa i ytan, och påverkar ner till ett djup på över 10 μm . För både slipade samt slipade och polerade kugghjul är ökningen begränsad till 500 MPa och $<5\mu\text{m}$. Restspänningarna minskar sedan vid provning. Heningen har också påverkat materialets mikrostruktur då deformationsinducerad martensit bildats i ytskiktet och andelen restaustenit minskat från ca 20% till 10%. Bildandet av deformationsinducerad martensit kan bidra till de höjda tryckspänningarna för henade kugghjul. För slipade och henade kugghjul minskar andelen restaustenit vid provning medan den är relativt oförändrad för polerade prov. Undersökning i elektronmikroskop visade också hur mikrostrukturens förändring efter provning påverkades av tillverkningsmetoden. För slipade och henade kugghjul bildades deformationsband under provningen som beskrivits ovan och sprickor som ledde till att mikropitts bildades. Det var mest sprickbildning på slipade kugghjul. Däremot för polerade kugghjul var mikrostrukturen närmast oförändrad efter inkörning och verkningsgradsprovning vid hög last. Analyserats av de tribofilmer som bildats vid provningen med XPS visar väsentligt mer fosforföreningar finns i sådana filmer på henade och slipade kugghjul än på polerade ytor (Fig. 6). Dessutom har inkörningen haft en viss påverkan så att inkörning vid högre last ger mer fosfor i tribofilmerna även efter provning av verkningsgraden.



Figur 6. XPS profiler av P-halten i tribofilmen efter inkörning vid hög (...9) resp. låg (...5) last följt av verkningsgradsprovning för slipade (G), henade (H) och polerade (S) kugghjul.

Inverkan av slutbearbetningsmetoden på kugghjulens egenskaper efter tillverkning, verkningsgrad under provning och materialförändringar som uppstått efter provningen summeras i Tabell 1. Flera av dessa observationer varierar med varvtal, last och andra provparametrar så tabellen skall tas som en indikation av trender. Ett par samband kan noteras. Polering ger högst verkningsgrad och nästan inga skador, men är en mer kostsam metod. Slipning ger en bättre verkningsgrad än hening, men å andra sidan fler sprickor och mer micropits. En minskade andel restaustenit i de yttersta 5 µm efter hening är kopplad till ökade tryckrestspänningar. De deformationsband som bildas efter några tusen lastcykler medverkar till bildandet av sprickor och micropitting.

Slutbearb.	Efter tillverkning			Provning	Efter provning		
	Ytjämnhet	Rest-austenit	Restspänning tryck (MPa)		Verkningsgrad	Sprickor och pitts	Deformationsband
Slipning	Ojämn	~20%	~500	Mellan	Mest	Ja	Mest
Hening	Mellan	~10%	~1000	Lägst	Ja	Ja	Mindre
Polering	Jämnast	~20%	~500	Högst	Nästan inga	Nej	Lite

Tabell 1. Översiktliga observationer för olika slutbearbetningsmetoder.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt		
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

Bergstedt E., Lindholm P., Olofsson U., INFLUENCE OF THE DIN 3962 QUALITY CLASS ON THE EFFICIENCY IN HONED POWDER METAL AND WROUGHT STEEL GEARS, Nordtrib2018 Uppsala 18-21 Juni 2018.

M. Andersson, M. Sosa, and U. Olofsson, "Efficiency and temperature of spur gears using spray lubrication compared to dip lubrication," *Journal of Engineering Tribology*, vol. 231(11), pp. 1390-1396, 2017.

M Tu, M. Sosa, M. Andersson, U. Olofsson, Modelling power losses of cylindrical roller bearings in an FZG gear test rig, *Bearing Journal* Vol. 2, pp. 51-59, 2017.

Bergseth E., Olofsson U., Sosa M., Andersson M., EXPERIENCES OF STUDYING GEAR TRIBOLOGY IN A FZG TEST SET-UP Nordtrib2018 Uppsala 18-21 Juni 2018.

Tu M. *Validation and modeling of power losses of NJ406 cylindrical roller bearings*. Master thesis, KTH, Stockholm , 2016.

Sosa M., Running-in of gears – surface and efficiency transformation, PhD thesis KTH, Stockholm 2017.

Sosa M., Sellgren U., Björklund S., Olofsson U., The hunt for the correct cell size. Lower wavelength cutoff effect on contact simulation with a focus on running-in, manuscript submitted for publication.

Sosa M., Andersson M., Olofsson U., Honed vs. Ground spur gears, effects of running-in, roughness and form, manuskript under bearbetning

Bergstedt E., Sosa M., Andersson M. Olofsson U, Surface vs. form on the efficiency aspect of spur gear drives, manuskript under bearbetning

Mallipeddi D, Norell M, Sosa M, Nyborg L. Influence of running-in on surface characteristics of efficiency tested ground gears. *Tribol Int* 2017;115:45–58. doi:10.1016/j.triboint.2017.05.018.

D. Mallipeddi, M. Norell, M. Sosa, L. Nyborg, Effect of running-in load and speed on surface characteristics of honed gears, 6th World Tribology Conference 2017, Beijing China (*an extended version in a journal is forthcoming*)

Mallipeddi, D Surface integrity Characterization of Gears with respect to Running-in, Licentiate thesis, Chalmers Gothenburg, 2016

Subbaramaiah Naidu, V.M., Surface Characterization of Contact Fatigue tested Ground Spur Gears, Master thesis, Chalmers Gothenburg, 2017

Mallipeddi, D, forthcoming articles with different co-authors

- The effect of manufacturing method and running-in load on the surface integrity characteristics of efficiency tested spur gears
- Microstructural changes associated to micro pitting of spur gears
- Micro pitting and surface characteristics evolution during contact fatigue testing of spur gears

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Följande slutsatser kan dras från projektet:

- Förändringar i yttopografi och form kan mätas in situ i en kuggväxel med en profilometer. Denna metodik möjliggör att mäta utan att förändra systemet. Metodiken möjliggör också att man kan beräkna t.ex. hur kuggkontaktens kontaktrycksfördelning påverkas av både yttopografiförändringar såväl som formförändringar under en kuggkontakts livslängd.
- Påverkan av slutbearbetningen på materialstrukturen är mycket grund och koncentreras till de yttersta 5-10 μm . Motsvarande gäller även för påverkan vid användning.
- Restspänningsbilden som skapats vid slutbearbetning förändras inom denna zon i ett tidigt skede vid användning (100-tal cykler). Restspänningsbilden är komplex med olika utfall i olika riktningar, men resultatet pekar på en initieell ökning av tryckrestspänningsnivån följt av en gradvis relaxering allteftersom provningen fortlöper.
- För polerade kuggytor påverkade inte inkörningslasten, kuggkontaktens verkningsgrad eller yttopografi. Responsen visar att de polerade kuggytorna, redan var färdiginkörda vid provningens start. Detta var inte fallet för henade eller slipade kugghjul, för vilka en högre inkörningslast var mer robust i form av både slätare ytor och högre verkningsgrad efter inkörningsprov. De polerade kuggytorna uppvisade också mycket lite plastisk deformation på ytskiktet efter provning, till skillnad mot de slipade och henade kugghjulsparerna.
- Yttopografistudier visade att asperit-topparnas höjd reduceras i huvudsak under de första inledande kontaktorna. Också friktionsförlusterna är signifikant större under de första inledande cyklerna.
- Förändringarna i ytan när det gäller asperiteter och kontaktförhållanden har stor betydelse för mikrostrukturpåverkan och defektinitiering vid inkörning och användning.
- Förändringar som observerats innefattar minskad restaustenhalt, lokaliserad plastisk deformation av martensiten (skjuvning i band) och sprickinitiering kopplat till dessa band.
- En metodik att mäta en kuggväxels lagerfriktion in situ har utvecklats i projektet, Resultaten från dessa mätningar i jämförelse med tidigare publicerade lagerfriktionsmodeller, är att ett byte av lagerfriktionsmodell påverkar mer energiförlustmodelleringen av en kuggväxel än att de här provade inkörningsmetoderna.
- Inkörning av kuggytor kan simuleras med en modell som använder ytans hårdhet och yttopografi med rätt vald upplösning som indata.
- Utveckling av tribofilmer på kuggytan är komplex. Henade och slipade ytor uppvisar högre ytkoncentration av fosforföreningar jämfört med polerade ytor. Högre inkörningslast ger generellt även högre ytkoncentration av fosforföreningar. En möjlig slutsats är att additiven som förväntat stimuleras till reaktion med ytan med ökande kontaktryck.

Fortsatt forskningsområden för att förbättra kuggväxlars prestanda, är t.ex. att använda bättre stål. Att närma sig kullagerkvalitet på kuggstålet genom mer isotropt stål är en intressant fortsatt forskningsinriktning. En annan att använda ett pulvermetallurgiskt stål som är helt tätt utan porer.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Chalmers teknisk högskola, Institutionen för industri- och materialvetenskap

Tekn. lic. Dinesh Mallipeddi (doktorand)

Dr. Mats Norell

Professor Lars Nyborg

V.M. Subbaramaiah Naidu (exjobbare)

KTH, Institutionen för Maskinkonstruktion

Tekn Dr Mario Sosa (doktorand)

Minghui Tu (Master exjobbare)

Dr Stefan Björklund

Dr Jiachun Lin (post doc)

Professor Ulf Olofsson

Volvo Powertrain

Lenart Johansson

Scania CV AB

Mats Henriksson

Matti Näslund



CHALMERS

