



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

FFI Hållbar tillverkning av framtidens transmissionsdetaljer



Redaktör Thomas Lundholm (KTH Industriell produktion)
Bidrag från Arne Melander, Swerea KIMAB AB/ KTH Industriell produktion,
Alireza Khodae Kalatehali, KTH Industriell produktion,
Sven Haglund, Swerea KIMAB,
Thomas Björk, Swerea KIMAB AB,
Constantinos Frangoudis, KTH Industriell produktion,
Eva Troell, Swerea IVF AB/Värmebehandlingscentrum VBC,
Hans Kristoffersen, Swerea IVF AB/Värmebehandlingscentrum VBC,
Albin Stormvinter, Swerea IVF AB/Värmebehandlingscentrum VBC,
Anders Olofsson, Scania CV AB

2015-06-17

Delprogram Hållbar produktionsteknik

Innehåll

1. Sammanfattning.....	3
2. Bakgrund	4
3. Syfte.....	4
4. Genomförande.....	5
5. Resultat	5
WP2 Tillverkning av retarderaxel (kuggrullning och efterföljande värmebehandling).....	5
WP3 Tillverkning av högbelastade kugghjul av rena stål.....	8
WP4 Inverkan av härbarhet på formförändringar vid värmebehandling	14
6. Spridning och publicering.....	19
6.1 Kunskaps- och resultatspridning	19
6.2 Publikationer	20
7. Slutsatser och fortsatt forskning.....	21
8. Deltagande parter och kontaktpersoner	22

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

1. Sammanfattning

Nya utmaningar mot mer miljövänliga drivlinor i framtida kommersiella fordon ställer krav på prestanda och tillverkning av transmissioner. Högre hållfasthetskrav möjliggör att högre kan tas av transmissioner av samma storlek som idag eller att de kan göras mer kompakta. I det här projektet fokuserar vi på två metoder för att göra kugghjul mer höghållfasta, nämligen att ersätta kuggfräsning med kuggrullning baserat på plastisk formning och införandet av rena stål med reducerat innehåll av inneslutningar. För att dra nytta av utvecklingen av kuggrullning, måste sätthärden förbättras så att spridningen i formavvikelse minskas. Detta kan göras med bättre beredning med hänsyn till spridningen av egenskaper hos inkommande material och därmed minskad spridning av produktionsresultat.

Det är möjligt att framställa kugghjul med höga moduler (t ex 4) med kuggrullning i kommersiella maskiner. Kvaliteten på tillverkade kugghjul är ännu inte på målnivån för lastbilstillämpningar. Vi når kvalitet 11 (utan efterbehandling) i våra experiment men ytterligare förbättringar kräver mer arbete och forskning. FEM är ett mycket tillförlitligt verktyg i beredning att användas för kvalitetsoptimering. Det är nödvändigt att simulera kuggrullningsprocessen för en ny komponent innan man investerar i verktyg och pilottester. Med nuvarande forskningsresultat kommer rullning vara dyrt för att nå kvalitet på 5-6 (efter slutbehandling) för höga moduler (över 2.5 mm). Processen kan användas för små moduler under 2.5 mm för närvarande.

Skillnaden i skärbarhet för rena uppkolningsstål jämfört med konventionella uppkolningsstål med en svavelhalt på $S = 0,02-0,04$ vikt-% är liten. Mikrostruktur aspekter är troligen viktigare än svavelhalten. Detta är baserat på tester med grovsvarvning och ett experimentell test som efterliknar hobbning. I fallet med det undersökta verktygsstålet kan alternativa bearbetningsstrategier krävas. En annan verktygssort i grovsvarvning än den testade skulle förmodligen öka prestandan avsevärt. Kanske är det sannolika behovet att införa nya verktygskoncept i hobbningsprocessen mer krävande. Snabbstålsubstratet i konventionella hobbar blir överhärdat i framkant av den högre temperaturen som genereras i spånavsiljningen i varmarbetsstål. Men hobbar gjorda av belagd hårdmetall är kommersiellt tillgängliga både i fasta och indexerbara koncept. Skärbarheten för rena stål kan karakteriseras enligt följande: a) något mer adhesiv i kontakten mellan verktyg och spåna, b) något svårare spån brytning, c) något mer värme i skärzonen med rena stål, d) kombinationen av ny generation av strukturerade aluminium-CVD-beläggningar av svarvverktygskvaliteter och rena stål med ett minimum av abrasiva oxider och finkorniga mikrostrukturer ger en enorm potential för ökad produktivitet och e) de minimala abrasiva slitbeståndsdelarna i dessa stål gör en hög och stabil livslängd även med PVD-belagda solida hobbar.

Vid härdning bildas martensit, med en större volym än ursprungsfasen. Detta resulterar i formförändring, vilken i viss mån är förutsägbar och sålunda kan kompenseras i mjukbearbetning. Önskade, icke-systematiska, formförändringar som uppkommer efter värmebehandling är komplexa och kan orsakas av många faktorer. Alla steg i tillverkningen av stål och tillverkning av komponenter är potentiella källor till formförändringar som visar sig efter värmebehandling. Effekten av härdbarheten på formförändringar är betydande. Projektet har visat att en formförändring av enkla geometrier såväl som industrikomponenter påverkas av härdbarhet, d v s legeringsinnehåll. Det är viktigt att vara konsekvent i metod hur man beräknar härdbarheten och att följa upp variationer i härdbarhet för olika göt. Också legeringselement som inte ingår i härdbarhetsmodeller påverkar formförändringar, t ex (Al, Ti, Al / N). Härdbarhetsberoende geometrisk kompensering i mjukbearbetning verkar möjlig för att minska de skadliga effekterna av formförändringar. Kompenseringen måste tas fram under kontrollerade produktionsförsök och förmodligen individuellt för varje stålleverantör. Härdbarhetsuppgifter från stålproducenterna verkar mer tillförlitliga jämfört med beräkningar som gjorts med gängse metoder. Det finns en god potential att systematiskt undersöka formförändringar genom produktionsuppföljning. Identifiera relevanta faktorer och hålla så många av dem som möjligt konstanta och bara studera variationer i härdbarhet och kemisk sammansättning. Multivariat dataanalys är ett användbart verktyg.

2. Bakgrund

I Sverige arbetar mer än 5000 personer med produktion av växellådor 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.

Kugghjul används i nästan alla applikationer som kräver kraftöverföring. Ett ytterligare bevis på betydelsen av transmissioner och transmissionskomponenter är att ungefär en fjärdedel av tillverkningskostnaden för personbilar och lastbilar är relaterade till transmissionskomponenter.

Medan förbättringar i prestanda för kugghjul har planat ut under de senaste åren, kan ny teknik ge ännu större prestandaförbättringar. Dessa förbättringar går hand i hand med övergripande ansträngningar att uppnå en hållbar teknik eftersom de mer slitstarka och kompakta transmissioner med försumbart ljudnivå i drift och nära 100% energieffektivitet.

3. Syfte

Nya utmaningar mot mer miljövänliga drivlinor i framtida kommersiella fordon ställer krav på prestanda och tillverkning av transmissioner. Högre hållfasthetskrav möjliggör att

högre kan tas av transmissioner av samma storlek som idag eller att de kan göras mer kompakta. I det här projektet fokuserar vi på två metoder för att göra kugghjul mer höghållfasta, nämligen att ersätta kuggfräsning med kuggrullning baserat på plastisk formning och införandet av rena stål med reducerat innehåll av inneslutningar. För att dra nytta av utvecklingen av kuggrullning, måste sätthärden förbättras så att spridningen i formavvikelse minskas. Detta kan göras med bättre beredning med hänsyn till spridningen av egenskaper hos inkommande material och därmed minskad spridning av produktionsresultat.

4. Genomförande

Projektet delades in i fyra arbetspaket för projektledning (WP1), utveckling av kuggrullning och efterföljande värmebehandling (WP2), utveckling av bearbetning av rena uppkolningsstål (WP3) och studier av hur ståls hårdbarhet påverkar formförändringar vid värmebehandling (WP4).

5. Resultat

WP2 Tillverkning av retarderaxel

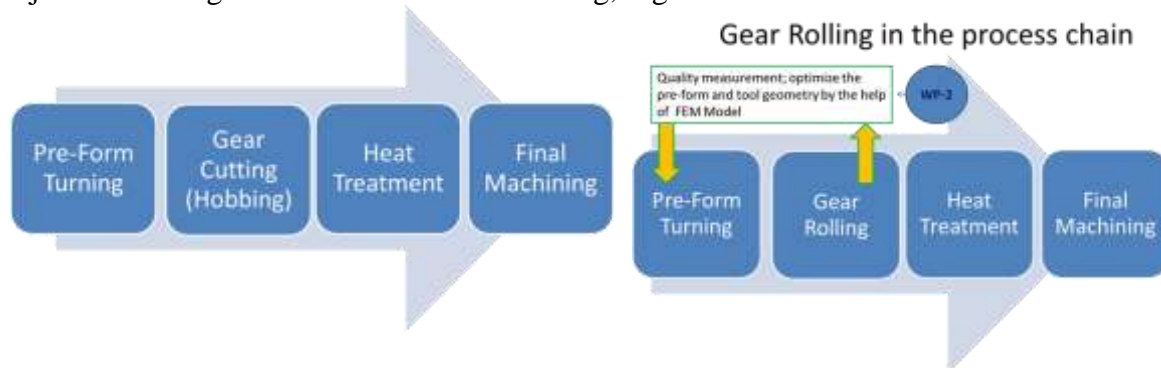
(kuggrullning och efterföljande värmebehandling)



Figur 1 Kuggrullning.

Idag börjar den dominerande tillverkningskedjan för kugghjul för lastbilstillämpningar med ett smitt ämne som svarvas och fräses, följt av värmebehandling och slutligen hårdbearbetning, Figur 1Figur 2. En intressant alternativ processkedja används för personbilsapplikationer där kuggfräsningen ersätts av kuggrullning. I denna tillverkningsprocess ersätts materialavverknings av plastisk formning. Detta har flera fördelar som materialbesparing eftersom inga spånor produceras, att materialet hårdas, vilket ibland kan vara tillräckligt för slutlig användning samt formning av materialstruktur och defekter längs flankprofilen. Det senare innebär att utmattningsegenskaper hos kugghjulet kan förbättras eftersom de defekter som orsakar utmattningsbrott har mer gynnsam orientering än efter fräsning. I fallet med små kugghjul för personbilsväxellådor kan dessa egenskaper erhållas med höga

produktionshastigheter och med god dimensionsnoggrannhet, så att ingen ytterligare mjukbearbetning krävs innan värmebehandling, Figur 3.



Figur 2 Konventionell produktionskedja för kugghjul.

Figur 3 Produktionskedja med kuggrullning.

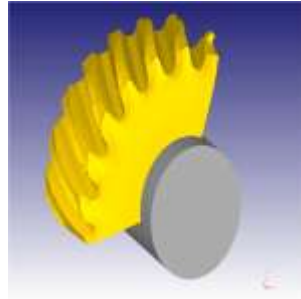
De goda erfarenheterna från kuggrullning i tillverkning av små kugghjul har väckt frågan om de goda egenskaperna hos kuggrullning också skulle kunna uppnås för stora lastbils-kugghjul. En demonstrator i form av ett spiralformat kugghjul med en spiralvinkel på 20 °, en tryckvinkel på 20 °, diametern 100 mm och en modul av 4 mm valdes. Alla stadier av produktion upp till sätthårdning studerades. Särskilt fokus riktades mot vilken formriktighet som kan erhållas efter kuggrullning eftersom denna faktor avgör om efterföljande bearbetningar skulle krävas som delvis skulle inkräkta på fördelarna. Det angavs att en ISO-kvalitet på kuggtandenens form runt 7 skulle krävas efter rullning.

Efter att ha valt demonstratorns kugghjulsgeometri beslutades att realisera produktionskedjan både med simulering och experimentella studier. I själva verket visade det sig att simuleringarna blev en viktig del av beredningen för experimentella försök.

Ett antal kuggrullningsförsök utfördes vid Fraunhofer IWU i en Rollex XL HP-maskin. Processbetingelserna som studerades med tredimensionella simuleringar studerades också experimentellt. Det konstaterades att simuleringarna på ett tillfredsställande sätt kunde återge de trender som observerats i försöken, Figur 4.



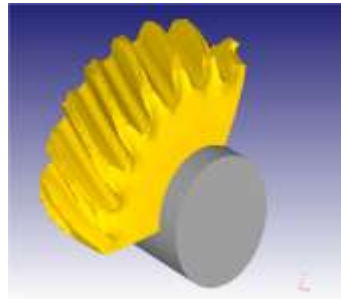
Experimentellt försök efter 6 mm penetrering av verktyget i ämnet.



Simulering av 6 mm penetrering av verktyget i ämnet..



Experimentellt försök efter full 13 mm penetrering av verktyget i ämnet.



Simulering av full 13 mm penetrering av verktyget i ämnet.

Figur 4 Experiment och simulering.

I båda fallen har ISO-kvalitetsnivåer på 11 för delning (F) och kvalitet 12 för evolventform (f_w) uppnåtts.

Dessa resultat visar att vi är långt ifrån kvalitetsnivån på 7 som krävs om vi vill utelämna fräsoperationer efter rullningen. Det kan vara möjligt att nå sådana kvalitetsnivåer men ansenligt utvecklingsarbete kommer att krävas för att gå från den nuvarande kvalitetsnivån på 11-12 till 7. Förmodligen kommer flera innovativa åtgärder att krävas för att nå de nivåer som krävs.

Figur 5 visar ett av kugghjulen som rullades hos Fraunhofer IWU. Notera kaninöronöppningar och axiell flytning av material. Figur 6 visar en etsad tvärsnitt från flankområdet. Man kan se att ytarean upp till ett djup av 0.5 mm är kraftigt kallbearbetat. Ytan på flanken är slät.



Figur 5 Kuggrullat kugghjul.



Figur 6 Etsat tvärsnitt av flankområde.

Bidrag till FFI-mål: Inga spånor, mindre materialåtgång, högre hållfasthet – minskad vikt och/eller högre kvalitet, snabbare process – högre produktivitet.

WP3 Tillverkning av högbelastade kugghjul av rena stål

Momentbelastning i tunga fordonstransmissioner har ökat med cirka tre gånger under de senaste 20-30 åren. Detta har uppnåtts med bland annat bibehållen vikt och utrymmeskrav för transmissionsdelar, av minskade toleranser, avancerade värmebehandlings- och nya konstruktionslösningar. Idag är dessa lösningar i materialteknik, produktionsprocesser och nya konstruktioner mycket optimerade. Ytterligare förbättringar är möjliga. De stål som används i transmissioner är mikrolegerade och normalt konstruerade för sätthärdning, ofta kallade "sätthärtningsstål". Ett kugghjul i sådant stål består av cirka 1 mm sätthärdat till ca 60 HRC och en kärna. Kärnan har också en martensitisk struktur, men med den ursprungliga kolhalten resulterar i en kärna med relativt hög seghet. Rena stål har kommit fram som en möjlighet att förbättra den grundläggande utmattningshållfastheten hos kugghjul. Roterande balkutmattningsprov har visat en 20-40% förbättrad utmattningshållfasthet. Hela tillverkningsprocessen är avgörande för utmattningshållfastheten. Viktiga aspekter är sätthärtningsprocessen i sig, bildandet av oxidskikt under ytan, efterföljande slipning eller honing och användningen av kulbombning av kugghjulets rot.

De aktuella testerna syftar till att utvärdera de två kandidaterna av högpresterande stål i Tabell 1 för tunga fordonstransmissioner.

Ståltillverkare	Benämning	Stålkarakteristika
Ovako	157C	Sätthärtningsstål, S=40 ppm
Uddeholm	Orvar Supreme	Varmarbetsstål, S=4 ppm

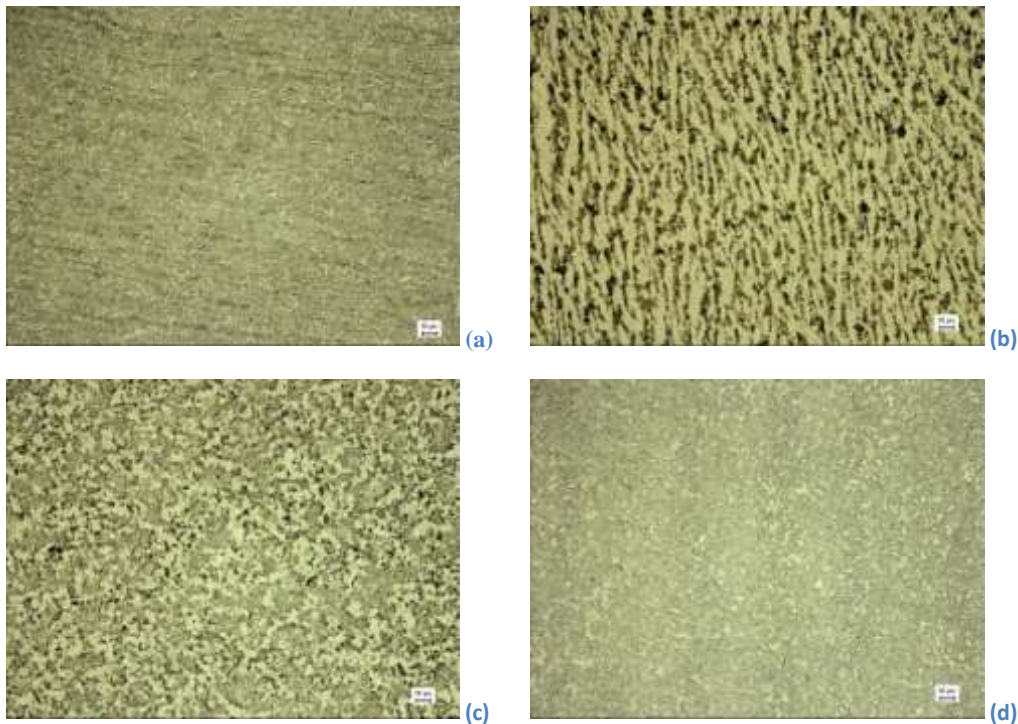
Tabell 1

Två demonstratorer användes som referenser och som möjliga transmissionsartiklar att introducera dessa rena stål, 2:ans växel för Scantias växellåda och en planetväxel i en Volvo-växellåda, se Figur 7. Båda komponenterna är massproducerade för nuvarande växellådsmodeller hos deras respektive företag. Ritningar, specifikationer och bearbetningsprocessen gjordes tillgängliga från de industriella parterna. Stålen i demonstratorer komponenterna hade typisk renhet, 0.02-0.04% S.



Figur 7 Scantias 2:a växel och och Volvos planethjul.

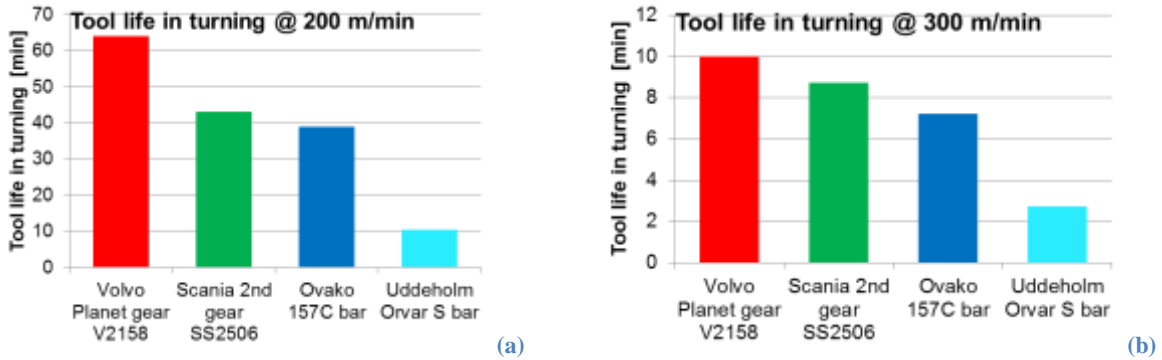
De mikrostrukturer som erhållits genom ljusoptisk mikroskopi visas i Figur 8.



Figur 8 Representativa mikrostrukturer av detaljer och material använda i skärtester. (a) Volvos planethjul, (b) Scantias 2:a växel, (c) stång av Ovako 157C och (d) stång av Uddeholm Orvar Supreme.

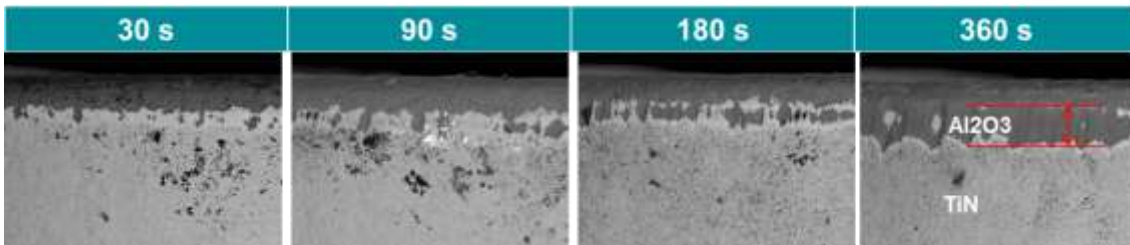
Verktygslivslängd i grovsvarvning visas i Figur 9. Volvos planetväxel visade en livslängd ca 30% bättre än Scantias 2:a växel. Orsaken är troligen i första hand olika mikrostrukturer hos de två materialen. Staplarna för Ovako 157C visar ungefär samma

livslängd som 2:ans ring. Uddeholm ger betydligt kortare livslängd än de andra. Detta tillskrevs tidig strålförlitning i dessa tester. Skillnaden fanns kvar också för 300 m / min.



Figur 9 Verktyglivslängder för de testade materialen och geometrierna i projektet vid (a) 200 m/min och (b) 300 m/min.

Ett särskild skärtest utformades för att utvärdera de abrasiva beståndsdelarna i kuggstålen i syfte att klargöra deras skärbarhetsbeteende. Nötning av beläggningar hos skärande verktyg är en av de viktigaste förlitningstyperna i både svarvning och i t ex hobbning. En uppsättning skärdata definierades. Plansvarvning användes på både kugghjulsämnen och stålstänger som provbitar. För att exemplifiera testproceduren, utsattes skärspets a) för 12 skär, spets b) för 36, spets c) för 72 och spets d) för 144 skär. Detta motsvarade ingreppstider som anges i Figur 10. Observera att de fyra testade materialen utsattes för samma spånskärlängd. Följaktligen modifierades det faktiska antalet skär beroende på den yttre och inre diametern av skäret för varje testmaterial. Resultaten ges i Figure 11.



Figur 10 Abrasivt test och utvärdering.

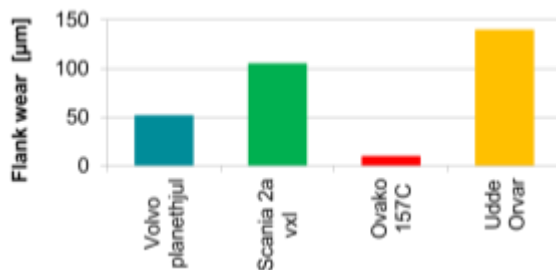


Figure 11 Stapeldiagram från abrasiva testresultat.

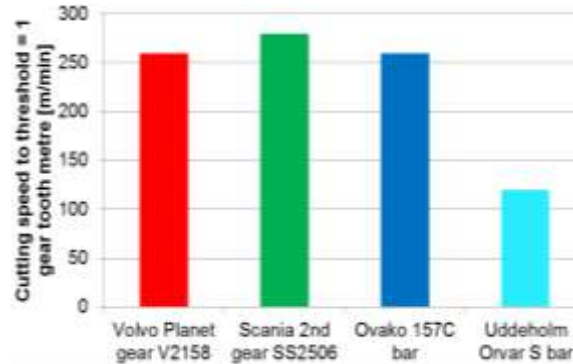
Ett bearbetningstest har utvecklats för att efterlikna skärförhållanden för konventionell hobbning med användning av PVD HSS-hobbar. Ett planfräsningskoncept användes med kommersiella cirkulära skärverktyg, se Figur 12. Likheten med kugghjulsbearbetning baseras på följande fakta:

- Vändskär tillverkade av PVD-belagda HSS. Skärvinklarna ändrades så att de påminner om faktiska solida hobbar.
- Geometrin hos de cirkulära vändskären efterliknar den variabla spåntjocklek som är typisk för kuggbearbetning.

Ett skärtest utvecklades så att spånvolymen skulle motsvara ungefär en rotmeter för ett typisk kugg. En testsekvens i trappsteg genomfördes för att hitta skärhastighetsövergången från go eller no-go för detta kriterium för spånavverkning. Resultaten ges i Figur 13.



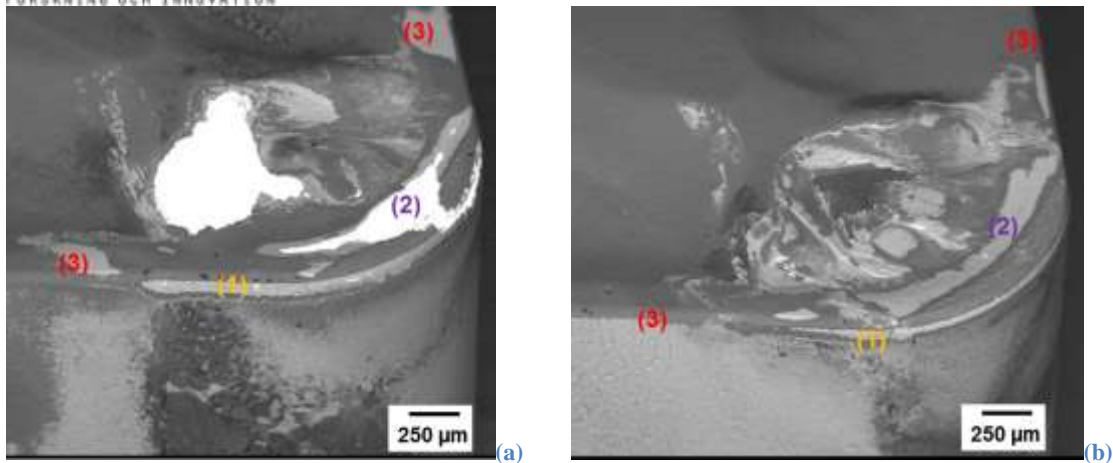
Figur 12 Bearbetningstest som efterliknar förhållanden vid konventionell hobbning.



Figur 13 Stapeldiagram för skärhastighetsövergången från go eller no-go för avverkad spånvolym som motsvarar en kuggrotmeter.

Fältförsök genomfördes vid introduktion av ett extremt rent stål med mekaniska egenskaper som är mer isotropa jämfört med konventionella stålqualiteter. Benämningen är Ovako 158Q. Testerna gjordes med en planetväxel av ca 85 mm i diameter. Referensstål var detsamma som används av Scania, benämnt SS2506. Dess mikrostruktur erhöles genom kontrollerad kylning. Ovako 158Q var av typiskt leveranstillstånd från ståltillverkningen. Deras motsvarande hårdheten var 162 HB (SS2506) och 192 HB (158Q). Den enklaste jämförelsen av bearbetning var sekvenser om 404 kugghjul med grovsvarvning. Ett Coromant CNMG120408 PM GC4325 skärverktyg utnyttjades. Skärhastigheten $vc = 260$ m/min, skärdjup $ap = 1-3$ mm och matning $f = 0.3$ mm.

Figur 14 visar skärkanter från försöken. (a) är från Scania SS2506 och (b) är från Ovako 158Q tester. (1) betecknar fasförslitningen. (2) visar förslitningen på spånytan. Notera det exponerade karbidsubstratet (vita området) i mikroskopbilderna för Scania SS2506. (3) motsvarar skärdjupet och beläggningssförslitning av skäreggen som härstammar från ett skalskikt från ringensmidet av Scania SS2506-testerna. Notera även att denna observation inte är en del av jämförelsen av stålets skärbarhet, men mer slitage associerat till ringsmidprocessen.



Figur 14 Mikroskopbilder av skärplattorna som användes i fältförsöket hos Swepart Transmission. 404 planethjul grovsvarvades med (a) Scania SS2506 och (b) Ovako 158Q. (SEM-BS av etsade skärplattor)

Följande slutsatser kan dras av detta arbete, med tillägg av några tankar och riktlinjer:

1. Skillnaden i skärbarhet för rena sätthärdningsstål jämfört med konventionella sätthärdningsstål med en svavelhalt på $S = 0.02-0.04$ vikt-% är liten. Mikrostrukturella aspekter är troligen viktigare än svavelhalten. Detta är baserat på tester i grovsvarvning och ett experimentellt test som efterliknar hobbning.
2. När det gäller undersökta verktygsstål kan alternativa bearbetningsstrategier krävas. En annat verktygssort i grovsvarvning än den som testats skulle förmodligen öka prestandan avsevärt. Kanske mer krävande är det sannolika behovet av att införa nya verktygskoncept för hobbningsprocessen. Snabbstålssubstratet i konventionella solida hobbar blir överhärdat i skärkanten av den högre temperaturen som genereras av spånavverkningen i varmaarbetsstålet. Men hobbar av belagd hårdmetall är kommersiellt tillgängliga både med fasta och indexerbara koncept.
3. Skärbarheten för rena stål kan karakteriseras enligt följande:
 - Något mer vidhäftning i verktyg-spånkontakten. Detta kan generera tidigt beläggningsslitage vid täta ingrepp och utgångar i processen, t ex i planfräsning. Observera att detta kan lösas genom en modifierad CNC-kodning av skärninggreppet.
 - Något svårare spånbrytning. Övergången från dåligt till bra spånbrytning är ungefär $f=0.05$ högre med rena stål.
 - Något mer värme i skärzonen med rena stål. Detta observeras som mer plastisk deformation av skärkanterna i test med ett rent stål i jämförelse med ett referensstål, om de testas vid samma skärhastighet.
 - Kombinationen av den nya generationen av strukturerade aluminium-CVD-beläggningar av svarvverktygskvaliteter och rena stål med ett minimum av abrasiva oxider och finkornig mikrostruktur ger en enorm potential för ökad produktivitet.
 - De minimala abrasiva slitagebeståndsdelarna i dessa stål ger en lång och stabil livslängd även med PVD-belagd solida hobbar.

Tankar och idéer om möjligheterna med rena och högpresterande stål i kugghjul:

1. Det rekommenderas att undersöka möjligheten att införa ultrarent stål från rörprodukt direkt i kugghjul. Förändringen skulle möjliggöra en besparing i ledtiden från stålverket till det tillverkade kugghjulet.
2. Betydande förbättringar i produktivitet och produktionsrobusthet kan erhållas genom att modifiera relativt grova mikrostrukturer av dagens stål som smidda. I allmänhet är en finkornig mikrostruktur bättre än en grov mikrostruktur för livslängden och robustheten hos skärverktyg.
3. Ca-behandlade stål har en stark potential för ökad både robusthet och produktivitet i kuggproduktion. Detta var inte en del av SMART-projektet men baserat på annan forskning.
4. Inom projektet har accelererade och representativa skärtester utvecklats med potential att jämföra skärbarhetsegenskaperna hos stål för kugghjul. Testerna kan utföras på stålstänger och smide. Följande processer kan screenas från en skärbarhetsaspekt:
 - grovsvarvning
 - hobbning, genom en vidareutvecklad test i planfräsning med ett kommersiell fräskoncept med runda skär tillverkade av PVD-belagda snabbstål
 - hårdsvavning (som en del av annan forskning).
5. Två bearbetningsprocesser som inte tas upp i detta arbete kan lyftas fram som möjliga problemområden med rena stål. De är borring och brotschning. Mer forskning rekommenderas inom dessa områden för att klargöra eventuella svårigheter.
6. Projektets fyra stål har jämförts med samma verktyglösningar. Det viktiga nästa steget skulle kunna vara att utveckla praktiska lösningar för bearbetningsprocesser. Alternativa verktygssorter är ett enkelt exempel på en sådan lösning.
7. De undersökta materialen hade sin egen geometri, stänger (med olika diameter) av Ovako 157C och Uddeholm Orvar Supreme, AD = 85 mm planetväxel från Volvo och en D = 145 mm andra växeln från Scania. Inverkan av geometri i testerna är sannolik. För ett framtida forskningsprojekt är det rekommenderat att använda samma geometri för alla fyra stål. Kanske planethjulsgeometrin är den enklaste.

Dimensionstoleranser, t ex ytterdiameter, för smidet, samt eventuella rester av skalskikt är förmodligen viktigare orsaker till förtida verktygsbrott och produktionsstopp än den lilla minskningen av skärbarheten av ett rent stål.

Contribution to FFI goals: Higher strength – reduced weight and/or higher quality.

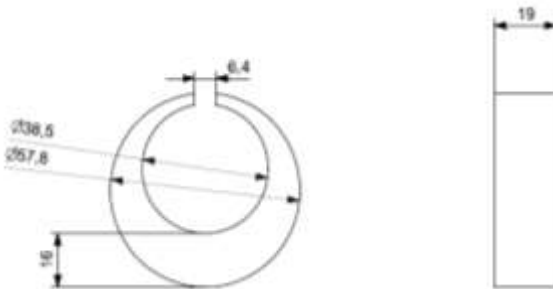
WP4 Inverkan av härbarhet på formförändringar vid värmebehandling

Formförändringar är ett stort problem i produktion av kugghjul och andra drivlinekomponenter. Att förstå och kvantifiera de faktorer som påverkar formförändring har länge varit angeläget när det gäller värmebehandling. Förutsägelse av dessa faktorer möjliggör både betydande kostnadsbesparingar och förbättrad produktkvalitet. Trots alla ansträngningar, är förutsägelse av formförändring efter sätthärdning fortfarande mycket svårt. Det slutliga målet är att fastställa sambandet mellan orsak och verkan i hela processkedjan: stål, gjutning, valsning, smide, bearbetning och härdning. Härdning är oftast den primära utlösaren av formförändring, även om formförändringspotential byggs upp genom hela produktionskedjan. Formförändring har väckt en hel del uppmärksamhet på sistone, särskilt genom det tyska initiativet Collaborative Research Center "Distortion Engineering". Namnet antyder det nya metodiskt tillvägagångssättet för behandling av formförändring som ett systemattribut för hela processkedjan. Detta kan tyckas självklart för somliga; ändå är det mycket viktigt att göra detta erkännande. Med andra ord: Det är nödvändigt att ha "systemattribut"-mindset när du forskar inom formförändringsteknik.

I det här projektet riktades uppmärksamheten mot effekten av härbarheten på formförändring. Härbarhet avser förmågan hos stål för bildning av martensit vid en viss kylningshastighet. Det ska inte förväxlas med hårdhet. Hårdheten som erhålls vid härdning är främst beroende av stålets kolhalt förutsatt att kylningshastigheten under härdning har varit högre än den kritiska hastigheten, det vill säga att övergången till martensit sker utan någon bildning av perlit eller bainit eller andra, mjukare strukturella komponenter. Härbarhet bör behandlas som en parameter. Det definieras som "mottaglighet för härdning genom snabb kylning" eller som "den egenskap, i järnlegeringar, som bestämmer djupet och fördelningen av hårdhet framställd genom snabbkylning". I allmänhet medger en ökning av legeringsinnehåll en minskning av kylningshastighet, d v s ökar härdbarheten. Härdbarhet kan bestämmas experimentellt eller beräknas. Ett stort antal studier har visat att härdbarhet har ett starkt inflytande på formförändring efter sätthärdning. Effekten är betydande och ganska komplicerad, eftersom härdbarheten är en egenskap med flera beroenden. De allra flesta beräkningsmetoder för härdbarhet bedöms från hårdhetsmätning av kommersiella stålsorter. Det finns också en uppfattning att ersätta faktisk hårdhetsmätning med beräkningar, eftersom spridning från testningen kan hanteras mer effektivt. Enligt internationella standarder är det också möjligt, på grundval av avtal mellan kund och stålleverantör, att ersätta tester med beräkningen under förutsättning att en accepterad beräkningsmodell används. De flesta leverantörer av stål har utvecklat formler för beräkning av härdbarhet, som är baserade på regressionsanalys från ett stort antal hårdhetstest genomförda på deras material. Dessutom finns flera regressionsmodeller för beräkning av härdbarheten tillgängliga. Dessa vanliga modeller passar oftast inte för exakta härdbarhetsberäkningar på en viss stålcharge. Snarare bör de användas för att jämföra härdbarheten mellan olika stålsorter. Ett väl specificerat härdbarhetsintervall är ett viktigt kriterium för komponenttillverkaren att genomföra en bra värmebehandling och minimerar formförändringen. Därför är korrekt härdbarhetsinformation för en viss charge nödvändig för effektiv beredning avseende formförändringar.

För att studera effekten av hårdbarheten på formförändringar redovisas teknikfronten för formförändringsteknik i projektet. Det är känt att bärare av formförändringar finns genom hela produktionskedjan och i den meningen kan anses generella för alla produkter. Ändå är det nödvändigt att vara mer komponentspecifik på grund av den höga graden av komplexitet i ämnet. I det här projektet har vi gjort ett försök att undersöka de mer allmänna effekterna av hårdbarhet på formförändring genom en betydande litteraturstudie och genom värmebehandlingsexperiment på enkla geometrier. Dessutom har vi försökt att isolera effekten av hårdbarheten på formförändringar på ett antal komponenter i produktionen i svensk industri.

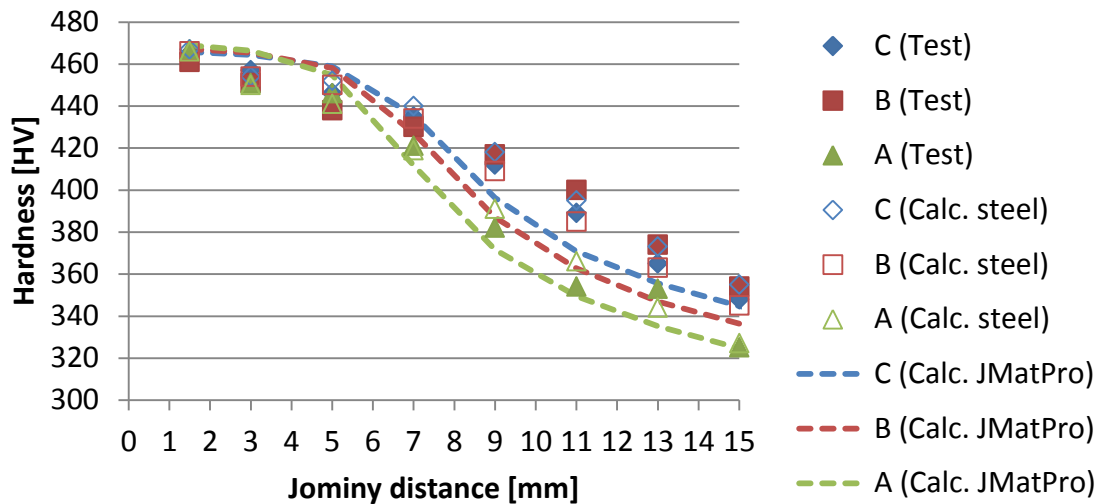
För värmebehandlingsexperiment på enkla geometrier använde vi stålsort 16NiCrS4 (SS2511), vilket är ett sätthärtningsstål. Tre olika charger, med olika kemisk sammansättning, av denna stålsort tillhandahölls som rör med en yttre diameter av 71.5 mm och en väggjocklek av 17 mm. Från rören bearbetades två enkla geometrier: (1) en ring med 70 mm ytterdiameter, väggjocklek av minst 16 mm och höjd 19 mm. (2) en modifierad Navy C-ring såsom framgår av Figur 15. Legeringsinnehåll och hårdbarhet för stålchargerna presenteras i Tabell 2 och Figur 16, respektive. Det beräknade värdet från stålproducenterna indikerade att hårdbarheten för $A < B < C$.



Figur 15 Form hos C-ring som användes för värmebehandlingsexperiment, mått i [mm].

Stålcharge	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Fe
Charge A	0,20	0,07	1,00	0,012	0,041	1,01	1,03	0,13	0,17	230 ppm	Bal.
Charge B	0,20	0,07	1,03	0,016	0,041	1,04	1,05	0,17	0,17	190 ppm	Bal.
Charge C	0,20	0,07	1,02	0,008	0,041	1,03	1,39	0,16	0,18	250 ppm	Bal.

Tabell 2 Kemisk sammansättning för 16NiCrS4-charger.



Figur 16 Hårdbarhet för de tre chargerna av 16NiCrS4 som användes i projektet. Chargerna är benämnda A, B och C. Hårdbarhet anges som: (Test): Jominy-test enligt ISO 642; (Calc. steel): Beräknad med modell från stålleverantör; (Calc. JMatPro): Beräknad med generell modell i mjukvaran JMatPro (version 8).

Totalt 30 C-ringar och 60 ringar värmebehandlades och analyserades för formförändringar, av vilka en tredjedel av stålcharge A, B och C respektive. En 3D-scanner användes för formförändringsanalys av C-ringar och en koordinatmätmaskin (CMM) användes för ringarna. C-ringar och ringar bearbetades först och avspänningsglödgades sedan. Därefter mättes geometri före och efter värmebehandling för att bestämma formförändring efter härdning. Värmebehandlingar utfördes enligt följande:

C-ringar:

- (Avspänningsglödning - 600 °C, 5 h)
- Upphettning – austenitisering vid 850 °C i vakuum under 1 timme, ingen uppkolning.
- Släckning – två olika satser:
 - 15 C-ringar i olja vid 45 °C, Petrofer VACUQUENCH 305.
 - 15 C-ringar i kvävgas på 9 bar.

Ringar:

- (Avspänningsglödning – 600 °C, 5 h)
- Upphettning – austenitisering vid 850 °C under 1 timme, ingen uppkolning.
- Släckning – två olika satser:
 - 30 ringar i olja vid 50 °C, Petrofer ISORAPID 229 FQ.
 - 30 ringar i salt vid 180 °C.

Hårdheten analyserades för de olika provbitarna och värmebehandlingarna. Med avseende på formförändring skulle kylning inte vara snabbare än vad som krävs för att uppnå önskade hårdhet. Här har vi använt fyra olika kylmedel, vilket resulterade i olika hårdhet för de enkla geometrierna. Som kan ses från Tabell 3, kan gasläckning i kväve vid 9 bar inte användas för att härda dessa C-ringar tillverkade av 16NiCrS4. Å andra

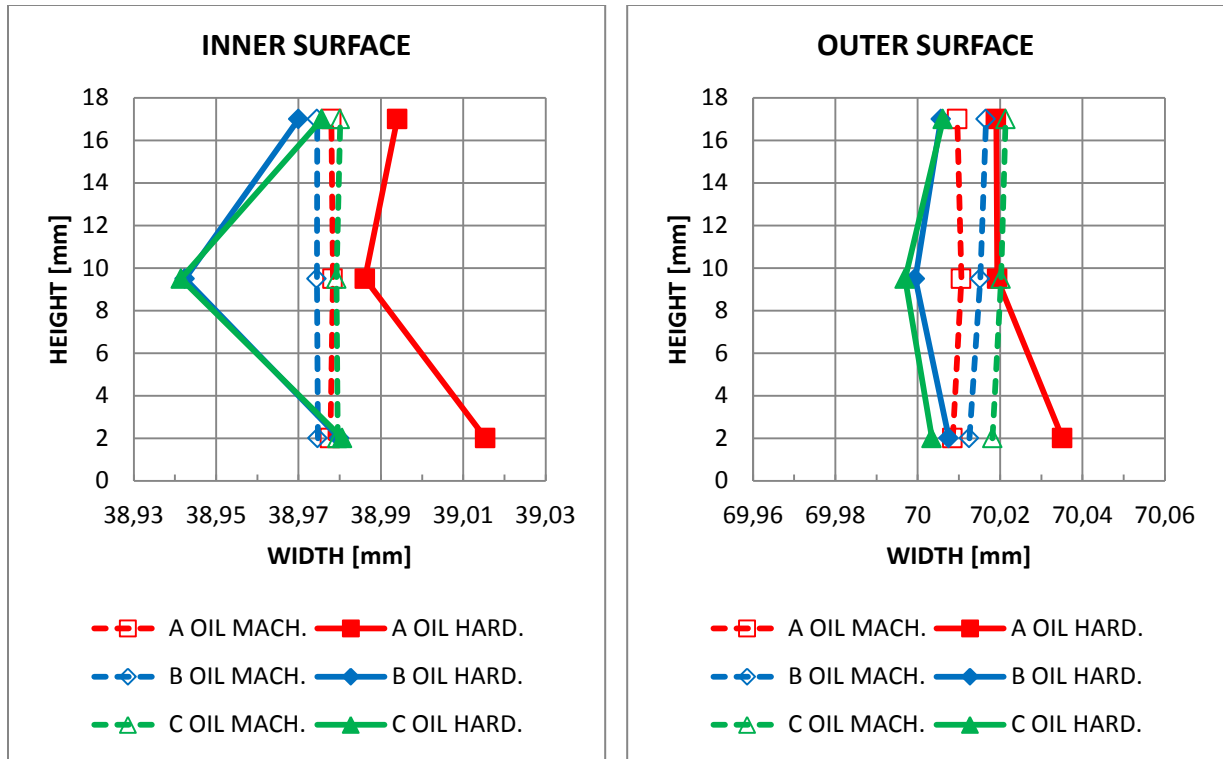
sidan, hade oljan VACUQUENCH 305 tillräcklig kylkapacitet för att uppnå en hårdhet av ca 40 HRC. En snabbare härdolja, ISORAPID 229FQ, som användes för ringarna, gav en ännu högre hårdhet, nära den maximala hårdheten hos denna stålsort i icke-uppkolade tillstånd. När istället salt användes var skillnaden i hårdhet bland de tre chargerna stor. Det är tydligt att föreliggande stålqualität och geometri inte är väl anpassade till kylkapaciteten för detta specifika salt.

C-ringformen, Navy-C-ringen, har tidigare använts för att analysera formförändring. Bortsett från vanliga kugggeometrier, har C-ringen en öppen geometri som blir mer känslig för formförändring. Här mätte vi formförändringen för 6.4 mm-spalten, som framgår av Figur 15. Spaltbredden analyserades från 3D-scanner-resultaten och det konstaterades att den vidgades vid härdning. Formförändringen var 5 hundradels mm för alla kvävesläckta C-ringar, därav ingen effekt av härdbarhet, vilket också korrelerade med hårdhetsresultaten. För oljesläckta C-ringar var formförändringarna större, 30-50 hundradelar, med charge A och B vid den nedre gränsen och charge C vid den högre gränsen. Även om effekten av härdbarheten kan konstateras, är det statistiska underlaget ganska litet.

Ringens formförändring mättes med en CMM. Här fokuserar vi på förändringen av ringens höjd och radiell formförändring, d v s förändring i inner- och ytterdiameter. De relativa förändringarna i höjd var proportionella mot härdbarheten; 1, 1.5 och 2 hundradelar för chargerna A, B och C, respektive. Den radiella formförändringen mättes vid tre olika höjder. Såsom framgår av Figur 17, blir inre och yttre ytor konvexa och konkava, respektive, efter kylning. När det gäller diametrarna, krymper dessa för charge B och C, men växer för charge A. En ring med lägre härdbarheten blir plattare och bredare medan en ring med högre härdbarhet blir tjockare och smalare. I båda fallen blir den inre ytan konvex, medan den yttre blir något konkav.

	C-ringar (10 rings/heat)		Ringar (20 ringar/charge)	
Stålcharge	VACUQUENCH 305	Kvävgas	ISORAPID 229FQ	SALT
Charge A	41.3±2.2	28.0±2.7	45.3±0.4	35.5±0.7
Charge B	39.7±1.7	28.0±1.6	44.9±0.5	40.1±1.2
Charge C	39.9±1.3	28.3±0.9	45.0±0.6	42.1±0.7

Tabell 3 Uppmätt hårdhet [HRC] hos värmebehandlade C-ringar och ringar. Hårdheten presenteras som medelvärde av alla provbitar från en sats, med tre hårdhetsprov per provbit. Noggrannheten anges som en standardavvikelse.



Figur 17 Radiell formförändring för oljekylda ringar. Radial distortion of oil quenched rings. Inner- och ytterytorna blir konvexa och konkava, respective Innerdiametrarna krymper för charge B och C, men växer för charge A.

Bortsett från att studera formförändring av enkla geometrier, studerade vi tre typer av komponenter för närvarande i produktion: (1) kronhjul, (2) pinjonger och (3) ringformiga kugghjul. Syftet var att isolera effekten av hårdbarheten på formförändring.

Datauppsättningen innehöll:

- 98 kronhjul från 5 olika stålcharger
- 288 pinjonger från 3 olika stålcharger
- 10 ringformade kugghjul från 2 olika stålcharger.

En sammanfattning av några allmänna synpunkter om formförändring:

- Vid hårdning bildas martensit, med en större volym än ursprungsfasen. Detta resulterar i formförändring, vilken i viss mån är förutsägbar och sålunda kan kompenseras för i mjukbearbetning.
- Oönskade, icke systematiska förändringar i form som uppkommer efter värmebehandling är komplexa och kan orsakas av många faktorer.
- Alla steg i tillverkningen av stål och tillverkning av komponenter är bärare av formförändringspotential som visar sig som formförändring efter värmebehandling.

Resultaten från formförändringsstudien på enkla geometrier och komponenter i produktionen kan sammanfattas enligt följande:

- Effekten av hårdbarheten på formförändring är betydande. Projektet har visat att en formförändring av enkla geometrier samt industrikomponenter sker genom hårdbarhet, d v s legeringsinnehåll.
 - Det är viktigt att vara konsekvent i metod hur man beräknar hårdbarheten och att följa upp variationer i hårdbarhet för olika charger.
 - Även legeringselement som inte täcks av hårdbarhetsmodeller har påverkan på formförändring, t ex (Al, Ti, Al / N).
- Hårdbarhetsberoende geometrisk kompensering vid mjukbearbetning verkar möjlig för att minska de skadliga effekterna av formförändring. Kompenseringen måste utarbetas från kontrollerade produktionsförsök och förmodligen individuellt för varje stålleverantör.
- Hårdbarhetsuppgifter från stålproducenterna verkar mer tillförlitliga jämfört med beräkningar som gjorts med vanliga metoder.

Det finns en god potential att systematiskt undersöka formförändring genom produktionsuppföljning. Identifiera relevanta faktorer och hålla så många av dem som möjligt konstanta och bara studera variationer i hårdbarhet och kemisk sammansättning. Multivariat dataanalys är ett användbart verktyg.

Contribution to FFI goals: Higher quality.

6. Spridning och publicering

6.1 Kunskaps- och resultatspridning

En effektiv och uppskattad aktivitet för resultatspridning har varit de återkommande kuggmötena, ett arv från tidigare kuggprojekt i MERA och FFI. 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 framtiden.

En avslutande aktivitet i projektet var en roadshow till Södertälje (Scania värd), Liatorp (Swepart Transmission värd) och Köping (Volvo värd) att rapportera industriellt tillämpbara resultat på plats. Detta initiativ var mycket uppskattat och drog stor publik.

Projektresultaten redovisas också i en wiki:

[http://130.237.56.41/mediawiki/index.php/FFI Sustainable manufacturing of future transmission parts %E2%80%93 SMART](http://130.237.56.41/mediawiki/index.php/FFI_Sustainable_manufacturing_of_future_transmission_parts_%E2%80%93_SMART).

6.2 Publikationer

Alireza Khodae and Arne Melander, Finite Element Simulation as a Tool to Evaluate Gear Quality after Gear Rolling, <http://www.scientific.net/KEM.554-557.300>, ESAFORM 2013- Aveiro, Portugal (2013) 300-306

Alireza Khodae and Arne Melander, Finite Element Analysis on the Friction Effects in the Gear Rolling Process, Stockholm, Sweden NEWTECH (2013) Vol 2, 93-102

Alireza Khodae and Arne Melander, Study of the Effect of the Reversal Cycles in the Gear Rolling Process by Using Finite Element Simulations, <http://www.scientific.net/KEM.611-612.134>, ESAFORM 2014, May (2014)- Finland 134-141

Alireza Khodae and Arne Melander, Finite Element Study of Rolling Loads in Gear Rolling of High Gear Wheels, , <http://www.scientific.net/KEM.622-623.986>, METAL FORMING- Sept (2014)- Italy 986-992

Alireza Khodae, Sven Haglund and Arne Melander, Case study for development of gear rolling process to use in heavy vehicle transmission production with Finite Element Method, possibilities and limitations (to be published)

Alireza Khodae and Arne Melander, Modifications of blank geometry to gain better product by gear rolling process with Finite Element Method (to be published)

A. Stormvinter, H. Kristoffersen, A. Olofsson, K. Biwersi, and S. Haglund, Effect of Hardenability and Press Quenching on Distortion of Crown Wheels, 5th International Conference on Thermal Process Modeling and Computer Simulation, 2014, pp. 149-155.

Project summary published in Värmebehandlingsforum nr 3-2012

20th Congress IFHTSE, 23-25 October 2012

Presentations at The Swedish Heat Treatment Centre member meetings 2013, 2014 and 2015

Presentations at Cluster conference in Katrineholm 2014, 2015

Summary of final results in Värmebehandlingsforum June 2015 (planned)

Presentation at Heat Treatment conference, Aktuellt om material och värmebehandlingsteknik, Västerås, 22-23 sept 2015: Härdbarhetens inverkan på formförändringar, Hans Kristoffersen, Swerea IVF (planned)

Presentation at 5th Int Conf on Distortion Engineering, 23 -25 September 2015, Bremen, Germany: Effects of Hardenability and Quenching on Distortion of Steel Components, Albin Stormvinter, Swerea IVF (planned)

7. Slutsatser och fortsatt forskning

Sammanfattningsvis kan man konstatera att kugghjul av storlek typisk för lastbilsväxellådor ännu inte kan tillverkas genom kuggrollning med tillräcklig noggrannhet. Formavvikelserna på kuggflankerna är så stora att ytterligare fräsning kommer att behövas efter rullning. Under dessa betingelser blir införandet av rullning i en produktionslinje för komplex och dyr. I alla andra avseenden visade de kuggrollade hjulen goda egenskaper. Så om det i den framtida utveckling kan göras i rullningsprocessen för att minimera formfelaktigheter, kan metoden bli tillämplig och fördelarna vad gäller materialåtgång och utmattningsegenskaper utnyttjas också för lastbilstillämpningar. Men vi är inte framme där än.

Det rekommenderas att undersöka möjligheten att införa ultrarena stål från rörprodukter direkt för kugghjul. Förändringen skulle möjliggöra en besparing i ledtid från stålverk till det tillverkade kugghjulet. Betydande förbättringar i produktivitet och produktionsrobusthet kan erhållas genom att modifiera den relativt grova mikrostrukturen hos dagens smidda stål. I allmänhet är en finkornig mikrostruktur bättre än en grov mikrostruktur för livslängden och robustheten hos skärverktyg. Ca-behandlat stål har en stark potential i både ökad robusthet och produktivitet i kuggproduktion. Detta var inte en del av SMART-projektet men baserat på annan forskning. Inom projektet har accelererade och representativa skärtester utvecklats med potential att jämföra skärbarhetsegenskaperna hos stål för kugghjul. Testerna kan utföras på stålstänger och smide. Följande processer kan screenas från en skärbarhetsaspekt: a) grov svarvning, b) hobbning, genom ett vidareutvecklad test i planfräsning med ett kommersiellt fräskoncept med runda skär tillverkade av PVD-belagda snabbstål och c) hårdsvärvning (som en del av annan forskning). Två bearbetningsprocesser som inte tas upp i detta arbete kan lyftas fram som möjliga problemområden med rena stål. De är bormning och brotschning. Mer forskning rekommenderas inom dessa områden för att klargöra eventuella svårigheter. De fyra ståen i projektet har jämförts med samma verktygslösningar. Det viktiga nästa steget skulle kunna vara att utveckla praktiska lösningar för bearbetningsprocesser. Alternativa verktygskvaliteter är ett enkelt exempel på en sådan lösning. De undersökta materialen hade sin egen geometri, stänger (med olika diameter) av Ovako 157C och Uddeholm Orvar Supreme, AD = 85 mm planetväxel från Volvo och en D = 145 mm andra växel från Scania. Inverkan av geometri i testerna är sannolik. För ett framtida forskningsprojekt är det rekommenderat att använda samma geometri för alla fyra stål. Kanske en planetjulsgeometri vore enklast.

Effekten av hårdbarheten på formförändring är betydande. Projektet har visat att formförändring av enkla geometrier samt industrikomponenter påverkas av hårdbarhet, dvs legeringsinnehåll. Det är viktigt att vara konsekvent i metod hur man beräknar hårdbarheten och att följa upp variationer i hårdbarhet för olika charger. Även legeringselement som inte täcks av hårdbarhetsmodeller påverkar på formförändring, t ex (Al, Ti, Al / N). Hårdbarhetsberoende geometrisk kompensering vid mjukbearbetning verkar möjlig för att minska de skadliga effekterna av formförändring. Kompenseringen måste utarbetas i kontrollerade produktionsförsök och förmodligen individuellt för varje stålleverantör. Hårdbarhetuppgifter från stålproducenterna verkar mer tillförlitliga jämfört med beräkningar som gjorts med vanliga metoder. Det finns en god potential att systematiskt undersöka formförändringar genom produktionsuppföljning. Identifiera relevanta faktorer och hålla så många av dem som möjligt konstanta och bara studera variationer i hårdbarhet och kemisk sammansättning. Multivariat dataanalys är ett användbart verktyg.

8. Deltagande parter och kontaktpersoner



Projektpartnerna är listade nedan.

Akademiska: KTH Royal Institute of Technology, Swerea KIMAB AB and Swerea iVF AB

Fordonsindustri: Scania and Volvo

Underleverantörer till fordonsindustrin (Fordonskomponentgruppen, FKG): Bodycote Värmebehandling, GKN Drivline Köping, Leax, Ovako Hofors, SwePart Transmission, Uddeholm

Övriga bolag: Oerlikon Balzers, Sandvik Tooling

Projektledare: Thomas Lundholm, KTH Royal Institute of Technology, tlun@kth.se, +4687906381