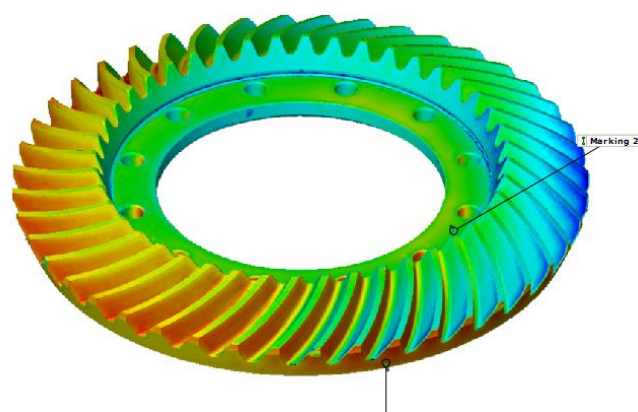


Minimering av Formförändringar vid Sätthårdning

”FFIFF”



Författare: Anders Olofsson Scania AB, Sven Haglund Swerim AB, Albin Stormvinter, Hans Kristoffersen RISE IVF AB

Datum: 2019-08-20

Projekt inom Fordonsteknisk Forskning och Innovation (FFI)

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	3
3 Bakgrund.....	5
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	7
5 Mål	8
6 Resultat och måluppfyllelse	8
7 Spridning och publicering	25
8 Slutsatser och fortsatt forskning	26
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	27

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

Att förutsäga och hantera formförändringar efter värmebehandling är en av de största utmaningarna vid tillverkning av högpresterande komponenter, t ex för transmissioner, hydraulik-, bergbrytnings- och andra maskinutrustningar. Dessa avvikelser i dimension och form beror på "formförändringspotential" i komponenten, som byggs in under hela tillverkningskedjan; från stålverk till färdig produkt. Formförändringen, summan av de olika bidragen, utlöses dock först i samband med härdningen. Oförutsägbar formförändring medför stora kostnader - merarbete i både beredning och i produktion. Exempelvis som: (1) ökade bearbetningstillägg och härddjup; (2) fler kassationer och (3) behov av efterbehandlingar.

Fokus för projektet har varit ny metodik för att minimera formförändringar för sätthärdade komponenter. Genom att mera effektivt hantera faktorer som ger upphov till formförändringar möjliggörs besparingar i alla produktionssteg. Vidare skapas miljövinster, främst genom kortare processtider, minskade kassationer och mindre omarbete.

Ett antal faktorer i hela processkedjan, stålverk-smedja-bearbetning-värmebehandling samt komponentdesign, har identifierats. Effekten på formförändring från dessa faktorer har utvärderats genom försök, uppföljning av produktionsdata och genom beräkningar.

Projektet har resulterat i riktlinjer och rekommendationer för hur effekten av vissa faktorer, som ger upphov till formförändringar, i de olika processtegen skall förstås, elimineras eller minimeras. Projektet har också tagit fram ett utbildningspaket, halvdag, för nödvändigt kompetensuppbyggande inom den svenska värmebehandlingsbranschen rörande formförändringsområdet. Detta är speciellt angeläget då en generationsväxling pågår.

Utbildningspaketet innefattar en rad tekniska aspekter såväl som metodik för hur arbetet kan genomföras. Utbildningspaketet lanserades på projektets slutseminarium som samlade ett 50-tal deltagare. Utbildningspaketet är projektdeltagarnas gemensamma egendom och kan således användas internt inom företagen eller att RISE IVF och Swerim bjuds in för att hålla kursen. Utbildningspaketet kommer på sikt också att lanseras för externt intresserade.

2 Executive summary in English

Predicting and managing distortions after heat treatment is one of the biggest challenges when manufacturing high-performance steel components, such as transmissions, hydraulics, mine drilling and other machine equipment. These deviations in dimension and shape depends on the "distortion potential" of the component, which is built in throughout the manufacturing chain; from steelworks to finished product. However, the distortion, the sum of the different contributions is mainly emerged in connection with the heat treatment/hardening. Unpredictable shape change entails large costs - extra work in both preparation and production. For example, as: (1) increased machining allowance and hardness depth; (2) increased scrapping and (3) more rework after the heat treatment.

Focus of the project is new methodology to minimize shape changes for case hardened components. A more effective managing of factors that give rise to shape changes allow savings in all manufacturing steps. Furthermore, environmental benefits are created, primarily through shorter process times, reduced scrap and less rework.

Several factors of importance in the entire manufacturing chain, steel mill-forging-machining-heat treatment and component design, have been identified. The effect on shape change of these factors

have been evaluated through experiments, follow-up of production data and through calculations.

The project has resulted in guidelines and recommendations on how to understand, eliminate or minimize the effect of certain factors that give rise to distortion in the various process steps. The project has also produced a training package, half-day, for the necessary competence building in the Swedish heat treatment industry regarding the distortion area. This is especially important since a generational change is in progress. The training package includes a number of technical aspects in the field as well as methodology for how the work can be carried out. The training package was launched at the project's final seminar, which gathered around 50 participants. The training package is the joint property of the project participants and can thus be used internally within the companies or by inviting RISE IVF and Swerim to hold the course. In the long term, the educational package will also be launched for externally interested parties. A selection of the technical results are listed below:

- The project has shown how the segregation lines / forging pattern can be quantified by conventional topographic methods (ISO 25178). Parameters from the standard have been used to characterize banding (Str), flow direction (Std) and wavelength (Sal).
- A concept for simple and fast FEM calculations was very effective for significantly improved understanding of how the complex interaction between geometry, case hardening depth, hardenability and cooling speed affect a ring segment's distortion potential. Basically, the degree of martensite transformation in the ring is of great importance. How this happens is an interaction between geometry, hardenability and cooling speed. However, this effect interacts with the hardening depth in such a way that a greater depth counteracts to some extent the impact of the martensite transformation, and that this effect is stronger with a small amount of martensite in the core.
- The project has been able to isolate the factor "heating rate" and has shown how it in itself gives rise to a change of shape where rapid heating can give greater shape deviations. This is an important knowledge to have when planning, for example, new investments or redesigning of existing equipment.
- Furthermore, the project has carried out a comprehensive study of a single quench tank where simulation and experimental work have been combined. The results corresponded well with physical measurements and could also be correlated with measured differences in the shape of rings from different positions in the load. The result is a well-described new design of the pump system which can be implemented by the component manufacturer.
- The results from the project component shows that all investigated factors have impact on distortion. Some show only weak relationships such as rolling geometry, forging orientation and machining. Others show strong effects after annealing for some of the properties, e.g. tooth width and outer diameter. The strongest effect is the quenching, where more powerful cooling gives greater shape errors. The high traceability has meant that several causes of shape change have been identified, quantified and systematized. An example is the effect of the origin carbon content variation in the steel on dimensional dimensions. Another is the systematic rotation of the roundness error that was visualized when the gear position and orientation were known. It is clear that the work on minimizing shape changes is complex, since the factors do not have the same effect on the different types of steel. Conclusions cannot be drawn from one type of steel to another, even if the same component geometry is used.
- The distortion of a ring shaped transmission component also depends on its positioning in the load during heat treatment. FEM calculations show that if a ring hangs vertically or lies horizontally it affects its shape. Hanging a ring gives chip shape, while lying a ring gives plate shape.

3 Bakgrund

Sätthårdning är idag den vanligaste värmebehandlingsmetoden för produktion av högpresterande komponenter i stål, t ex för drivlinor, hydraulik och gruvbrytningsindustrin. Värmebehandlingsprocessen utgör ett av de sista processtegen i komponenttillverkningen. Ett stort problem med sätthårdningsprocessen är att komponenten kommer få förändrad form och dimension efter hårdningen, s.k. formförändring. Det beror endast delvis på det faktum att när stål hårdar sker en volymökning som ett resultat av fasomvandlingen från austenit till martensit. Det är väl känt att det i hela processkedjan (stålverk-smedja-maskinbearbetning-värmebehandling) byggs in en rad av material- och processrelaterade faktorer som ger "formförändringspotential" som utlöses i den avslutande värmebehandlingsprocessen. Även komponentens geometriska utformning/design är av stor betydelse för den formriktighet som fås. Det är således helt normalt att både volyms- och formförändringar uppkommer vid hårdning. De senare är starkt beroende av valet av stål och värmebehandlingsprocess, men också i stor utsträckning av komponentens geometri. Oftast är formförändringarna osystematiska (slumpmässiga), dvs. de varierar från detalj till detalj i samma tillverkningsparti, vilket gör det svårt att i förväg kompensera för dem. Systematiska formförändringar, t ex pga av volymsökning vid martensitbildning, kan man i viss mån kompensera för vid konstruktion av detaljen och ta hänsyn till vid mjukbearbetningen. Osystematiska formförändringar hanteras idag genom:

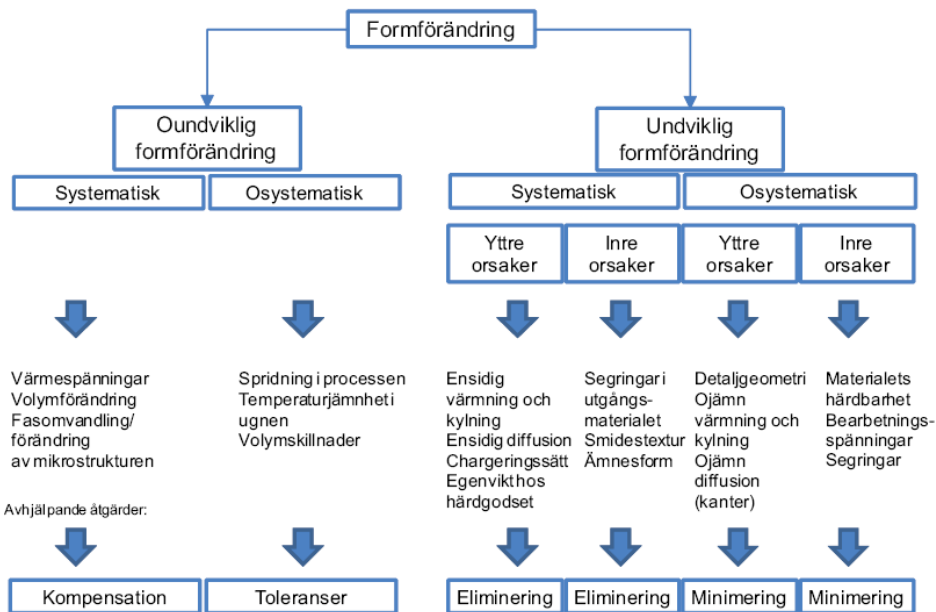
- tids- och kostnadskrävande försök i produktionsanläggningar för att hitta fram till rätt lastmönster för komponenter vid värmning i ugn och kylning i kylkar
- att komponenter med ur formförändringssynpunkt svår geometri tillgrips presshårdning i fixtur vilket ökar produktionskostnaden
- en större mängd hårbearbetning vilket kräver sliptillägg och extra marginal i sätthårdningsdjup, för att efter hårdningen kunna slipa fram rätt form.
- riktning av komponenter vilket påverkar komponentens prestanda
- i värsta fall kassationer av näst intill färdiga komponenter med högt förädlingsvärde.

Genom att minimera formförändringarna kan sätthårdningsdjupen minimeras, vilket ger kortare processtider och minskar behovet av slipning. Resultatet blir betydande förbättringar med avseende på både hållbarhet och tillverkningsekonomi.

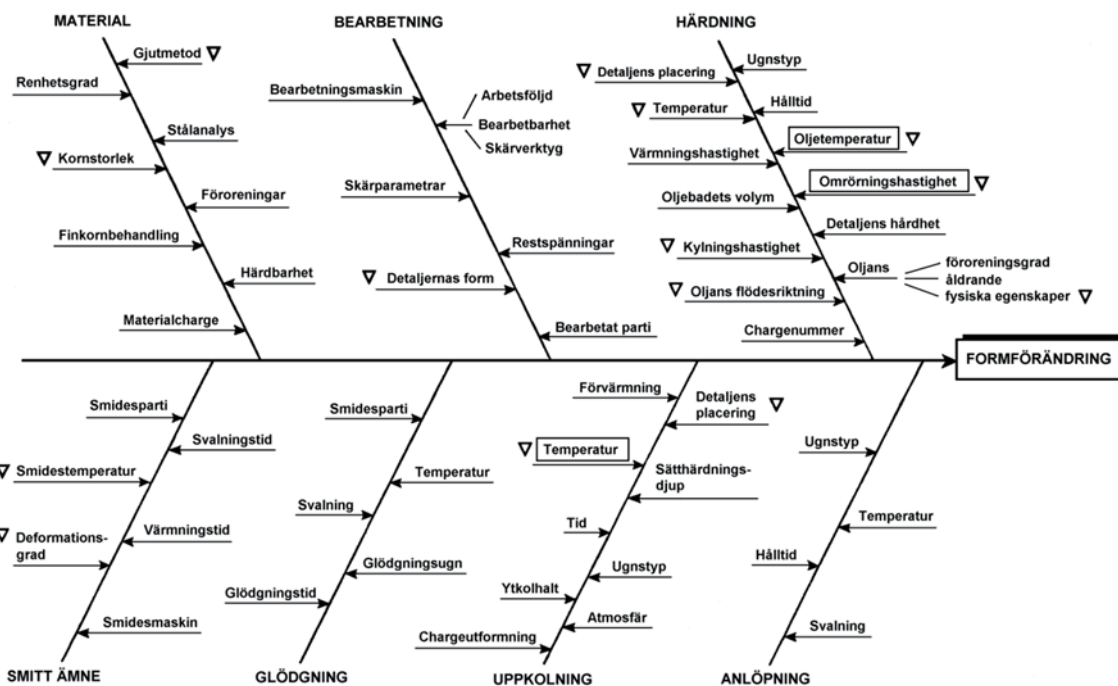
Olika angreppssätt har använts för att systematisera och beskriva formförändringars uppkomst hos värmebehandlade komponenter. I visas ett angreppssätt där formförändringarna i ett första steg antas vara oundvikliga eller undvikliga, därefter huruvida de är systematiska eller osystematiska samt på vilket sätt effekten av dem kan åtgärdas genom t ex kompensering, toleranssättning eller minimering genom förändringar i processkedjan.

Ett annat användbart sätt att systematisera uppkomsten för formförändringar är genom ett sk fiskbensdiagram, Figur 2. Här visas ett drygt 50-tal inverkanseffekter, systematiserade med hänsyn taget till deras ursprung i processkedjan.

Inom det tyska programmet "Distortion Engineering" (11-årigt FoU-program lett av IWT i Bremen, 2001-2011) identifierades en bruttolista innehållande mer än 200 faktorer från hela tillverkningskedjan som påverkar formförändring. Inom programmet genomfördes en rad experimentella och beräkningsbaserade studier för ett mindre antal utvalda faktorer, som t ex typ av ståljutprocess, kylning/värmebehandling efter smide, parametrar vid skärning bearbetning och stålets kemiska sammansättning. Reduktionen av antalet faktorer baserades på diskussioner, omvärldsanalyser och tidigare erfarenheter [3].



Figur 1 Systematiserad översikt över olika typer av formförändring vid härdning, deras ursprung och karaktär samt avhjälpan åtgärder.[1]



Figur 2 Faktorer som påverkar formförändringen vid sätthärdning av en detalj tillverkad från ett smitt eller valsat ämne. Faktorer markerade med ▼ har, eller kan ha, stor inverkan på formförändringen.[2]

Det är mycket svårt att uppskatta de totala kostnaderna som formförändringar medför. Ett exempel som ofta lyfts fram är en uppskattning för tysk maskinindustri från 1995. De totala kostnaderna ansågs ligga på 850 MEuro/år [4]. Inom tung fordonsindustri i Sverige har en uppskattning gjorts, baserat på förbättring av kuggform hos härdade kronhjul, från DIN 8±1 till DIN 7±1. Detta skulle innebära en besparing på ca 7,5 MSEK/år vid tillverkning av komponenter till 100 000 fordon. Besparingarna utgörs av minskad slipmån med kortare cykeltid och mindre verktygsslitage, minskat härdjup med kortare taktid i

uppkolningsugnen, mindre kassationer och minskad spridning mellan olika batcher. Det sistnämnda ger även tidsvinster genom färre och snabbare omställningar. Med minskade logistik- och sorteringskostnader får man för en hel konväxel (kronhjul och pinjong), en årlig besparingspotential på ca 12,5 MSEK. Med liknande potential för övriga sätthårdade artiklar kan den årliga besparingen approximeras till ca 30 MSEK/100 000 fordon, detta baserat på aktuellt företags ugnbeläggning i relation till konväxel. Motsvarande möjlighet bör finnas även inom övrig svensk transmissionstillverkande industri, inom övrig maskinindustri liksom i hela underleverantörsledet.

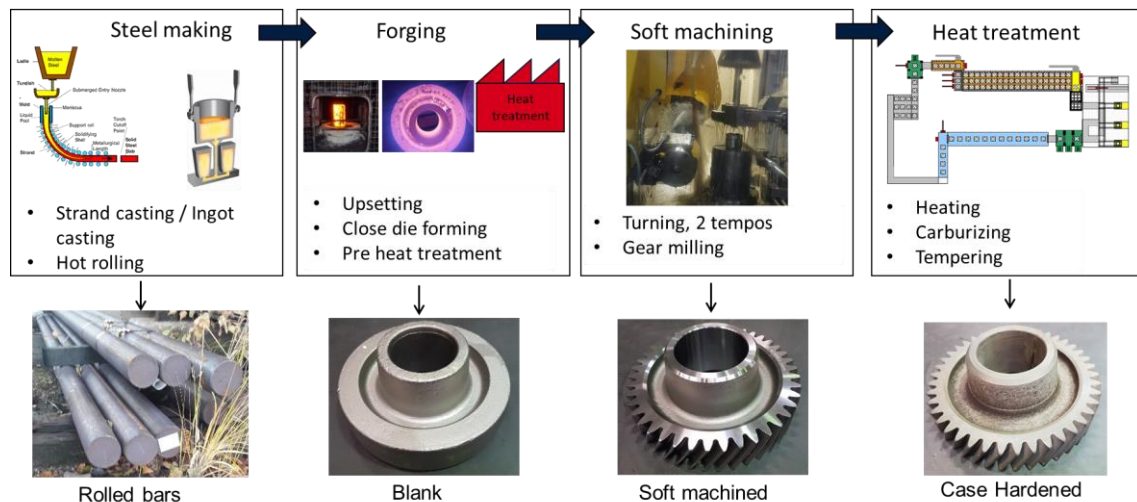
Mycket arbete finns således gjort och har tjänat som en god grund i urvalsarbetet nedan. Det finns dock fortfarande en rad luckor som behöver fyllas avseende t ex stålsorter, typ av komponenter (i det tyska arbetet studerades främst komponenter till personbilsindustrin, dvs mindre komponenter). Det är även av stor vikt för kompetensuppbyggnad inom svensk industri att forskning inom formförändringsområdet får en stärkt ställning. En viktig del i projektet är att rangordna effekterna av de olika faktorerna och fastställa metoder för hur de kan studeras, fastställas och åtgärdas genom t ex eliminering, minimering eller alternativa angreppssätt för t ex processtyrning, toleranssättning eller komponentdesign.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

I projektet har ett antal faktorer i förädlingskedjan för en smidd transmissionskomponent valts ut och studerats för att öka förståelsen för deras bidrag till formförändringar och vilka möjligheter det finns att t ex minimera eller eliminera dessa bidrag. En typisk förädlingskedja visas i Figur 3. Urvalet har skett genom initiala diskussioner med projektdeltagarna, omvärldsbevakning och tidigare erfarenheter.

Urvalsprocessen var även systemorienterad, dvs hela processkedjan beaktades. Således finns faktorer med ursprung från ståltillverkning, smide, skärande bearbetning och värmebehandling samt även konstruktion medtagna. De faktorer som är utvalda går också att återfinna i Figur 1 och Figur 2 och kunde i det tyska projektet anses som signifikanta. Det skall dock poängteras att man i det sammanhanget studerade nästan enbart gaskylning efter härdning. Detta är en kylningsprocess med begränsad användning i svensk industri, men som dock används mer och mer.

Experimentella försök och beräkningsbaserade metoder har ingått. Försöksplaner för de experimentella delarna baserades på flerkatorförsök (DoE) för att ge möjlighet att identifiera interaktionseffekter som är vanligt förekommande i sammanhanget. Beräkningsmetoder såsom FEM för termo-metallurgiska-mekaniska beräkningar av fasomvandlingar och formförändringar användes i beräkningsplaner baserade på DoE-principen. CFD-beräkningar kombinerades med praktiska mätningar för att studera hur strömningsförhållanden ser ut i kylkar och runt periferin på komponenter och för att studera möjligheterna att skapa jämnare förhållanden.



Figur 3 Förädlingskedja för en smidd transmissionskomponent.

En viktig del av projektet har också varit att etablera en arbetsmetodik för hur minimering av formförändringar kan göras. Denna metodik växte fram under projektets gång genom att utgå från tidigare arbeten och därefter anpassa och utveckla arbetssättet till en generisk checklista över kompetensbehov, tillgängliga metoder för statistiska analyser, beräkningar, materialundersökningar och kompetensbehov mm. Detta implementerades i utbildningspaketet.

5 Mål

Effektmål: Minska andelen osystematisk formförändring vilket reducerar behovet av efteroperationer, minskar tid för värmebehandling och minskar kassationer. Detta leder till minskade tillverkningskostnader och miljöpåverkan samt att konkurrenskraften stärks.

Projekt mål: Öka förståelsen för hur studerade faktorer inverkar på formförändringar hos transmissionskomponenter. Där så är tillämpligt tas riktlinjer fram för hur signifikanta effekter för formförändring kan minimeras genom åtgärder i processkedjan och i komponentens konstruktion vad gäller geometri och härdspekifikation. Detta leder till lägre produktionskostnader, minskade kvalitetsbristkostnader och reducerad miljöbelastning.

6 Resultat och måluppfyllelse

Projektet bestod initialt av tre arbetspaket (AP 1-3) med ett högt forskningsinnehåll där vart och ett bestod av ett antal delarbetspaket som innefattade olika moment av en transmissionskomponents värdekedja. Vid projektets start beslutades om att arbeta med en demonstrator kallad Projektkomponent som i realiteten kom att utgöra ett eget arbetspaket som också innehöll delar av det som initialt var planerat inom AP1-3.

I ett fjärde arbetspaket var avsikten att ta fram riktlinjer, checklistor och ett utbildningsunderlag för hur arbetet med minimering av formförändringar kan bedrivas.

Nedan redogörs i arbetspaketordning för erhållna resultat inom respektive arbetspaket. Resultat från Projektkomponent avhandlas separat under egen rubrik efter AP 3.

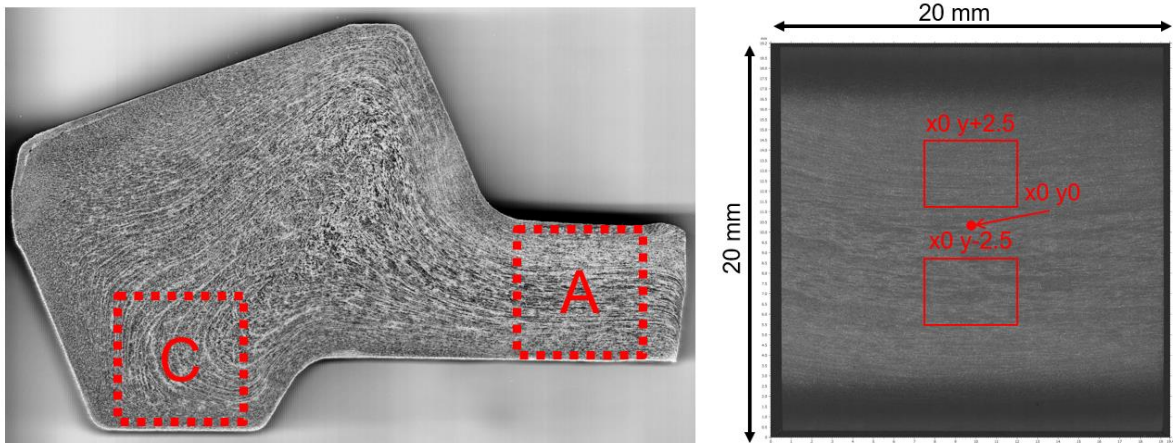
6.1 Arbetspaket 1: Smedja/Inverkan av tåga/bandning samt inverkan av utgångsstruktur

Vid tillverkning av komponentstål uppstår en segringsbild, oavsett gjutteknik, vid stelning från smälta till fast tillstånd. Segringar är lokala variationer i kemisk sammansättning inom stålämnet. Vanligtvis klassificeras segringar som mikro- eller makro, där den första är av storleksordningen μm och den senare betydligt större (i princip beroende av gjutmetod och geometri). Att gjutgeometri/segringsbild har inverkan på formförändringar vid härdning har visats av bland annat Seger, Gunnarsson och Zoch (Referenser från Bodin). Segringar som bildas vid gjutningen är således en bärare av formförändringspotential som påverkas, men inte elimineras, i efterföljande processteg som till exempel valsning och glödning. Seger menar att effekten från segring orsakas av skillnaden i kemisk sammansättning mellan diagonalriktningen och 45° -riktningen (mot strängens kortsida) och att detta leder till skillnader i diffusionshastighet, uppkolningsdjup, hårdbarhet och därmed hårdhet/härd djup i de olika riktningarna, under sätthärdningen.

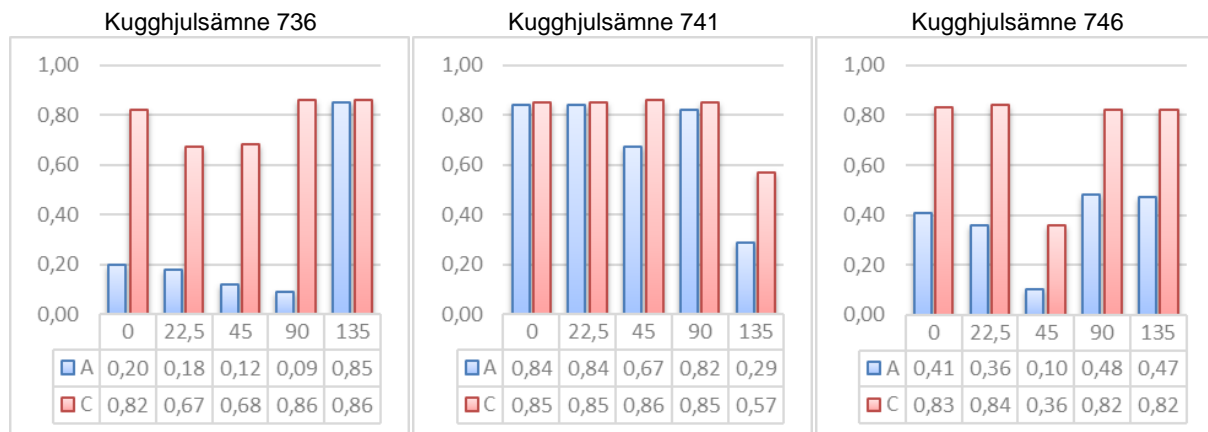
Trots att segringsbild (eller smideståga) är en viktig aspekt på formförändring är det en utmaning att hantera som en faktor i praktiken. Kvalitativ makroetsning (för att avbilda tåga) behöver kompletteras med en kvantitativ metod som ger mer information om flytkriktning, våglängd, (avstånd mellan mörka och ljusa band) och legeringsvariation. Därefter behöver man relatera egenskaper hos tågan med uppkomna formförändringar för att förstå hur tågan påverkar formförändringarna. [Figur 4](#) (vänster) visar ett etsat tvärsnitt av ett kugghjulsämne, där tåga framträder tydligt med flödesriktningar via ljus- och mörketsade områden. Makroetsning, som visas i bilden, skapar topografi genom att etsmedlet angriper och betar områden olika aggressivt beroende av lokal legeringshalt. Följaktligen, var projektets hypotes att modern topografianalys är tillämpligt för kvantifiering av tåga. Prover för topografianalys togs från tre olika kugghjulsämnena i fem tvärsnitt för respektive ämne. Område A och C, markerade i [Figur 4](#), kapades från tvärsnitt preparerade med ingjutning och polering. Kutsarna etsades med 8% Nital i cirka 1 minut före topografimätning. Metoden var interferens och utrustningen SENSOFAR S neox (10x objektiv, 4,38x3,29 mm mätarea, 5,16 μm lateral upplösning, 3x3 stitch med 25% överlapp mellan bilderna) samt programvaran Mountain Maps. Två mätningar utfördes i respektive område (se [Figur 4](#) höger) och resultat presenteras som medelvärden. För kvantifiering av tågan användes fyra parametrar beskrivna i standard ISO 25178 för topografimätning:

- Sa (arithmetic mean height of the scale limited surface); höjdskillnad, användes här för att se om etsningen varit likvärdig mellan olika prover i försöksserien.
- Str (texture aspect ratio); isotropigrad, användes här för att avgöra om topografien (tågan) är isotrop (1) eller anisotrop (0). Med andra ord om tågan visar en tydlig bandning.
- Std (texture direction of the scale-limited surface); Dominerande riktning angiven i grader ($^\circ$), visar vilken riktning som är dominerande för eventuell bandning enligt Str.
- Sal (autocorrelation length); medelvåglängd mellan "topp" och "dal"

Isotropigrad (Str) visas i [Figur 5](#), där framgår att position A i huvudsak uppvisar lågt Str för både kugghjulsämne 736 och 746 (med undantag av snitt vid 135° i 736). Det tyder på anisotropi och därmed att tågan är bandad med en dominerande riktning. Tåga för Position C har i många fall inte en entydig riktning utan kan vara krökt, se [Figur 4](#) höger, vilket gör att bandningen inte fångas av Str-värdet, se [Figur 5](#).



Figur 4 Vänster) Makroetsning för tågaavbildning i tvärsnitt. Två områden är markerade (A och C) för kvantitativ analys av tåga med hjälp av topografimätning. Höger) område A i högre förstoring inklusive mer detaljer om topografimätning/tågakvantifiering.



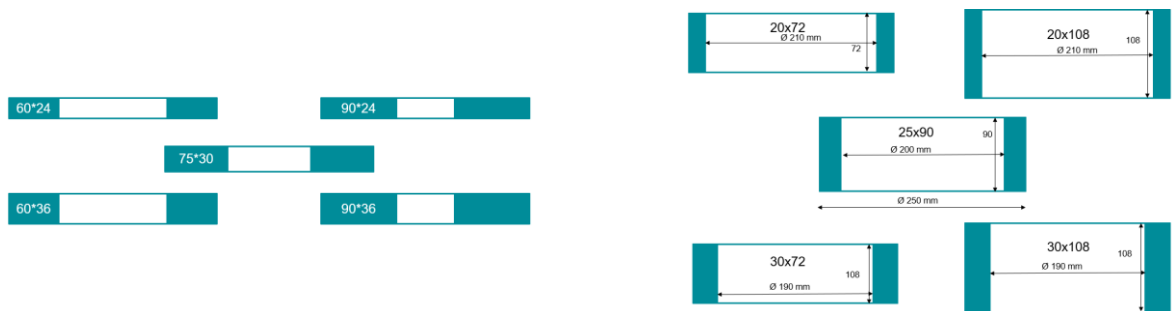
Figur 5 Resultat från tågakvantifieringen (topografimätning). Bilderna visar isotropigrad [Str] på y-axel och på raderna A och C. Talet som står angivet under staplarna är delningsgraden för snittet.

6.2 Arbetspaket 2: Inverkan av tvärsnittsgeometri, härdbarhet, härdjup och kylning

Tvärsnittets utseende har stor inverkan på hur formen förändras efter värmebehandling. Dessutom samverkar denna faktor starkt med faktorerna stålets härdbarhet, härdjupet och hur snabbt kylningen sker. Detta har studerats genom ett stort antal FEM-beräkningar utförda med beräkningsplan enligt DoE-principen.

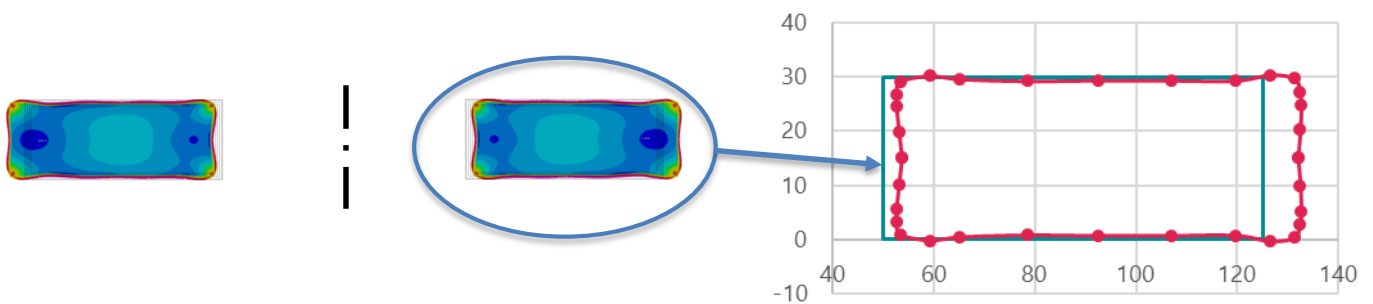
Nedan i

Figur 6 visar vilka ringtvärsnitt, "Platt Ring" och "Hög Ring som" ingått i de genomförda beräkningarna. Samtliga ringar hade en ytterdiameter på 250 mm. Ringarnas höjd och vägg tjocklek varierades med +/- 20 % utifrån den variant som utgör mittpunkt för respektive ringtyp. Den platta ringen representerar huvud/sidoaxelkugghjul, den höga är av typen ringhjul för planetväxlar. Inga kuggar fanns med i modellerna.



Figur 6 Ringtyper som studerats: vänster) platt ring höger) hög ring.

Fem-beräkningarna gjordes med 2D axisymmetriska modeller, se Figur 7. Vänster nedan. Därefter valdes ett färre antal noder ut vars förskjutningar i X- och Y-led väl representerade form- och dimensionsförändringen hos ringtvärsnittet, se Figur 7, höger. Formfelen är förstärkta med en faktor 100.

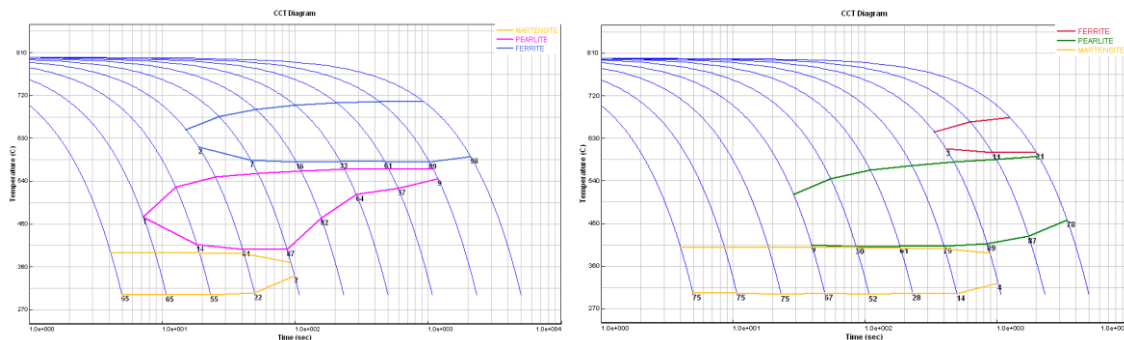


Figur 7 Axisymmetrisk beräkningsmodell. Vänster) visualisering av formförändring. Höger) Ursprunglig geometri i blått och formförändring efter värmebehandling i rött.

Utöver de olika ringtvärsnitten enligt ovan varierades vid beräkningarna faktorerna uppkolningsdjup, härdbarhet och kylningsintensitet, se även Tabell 1

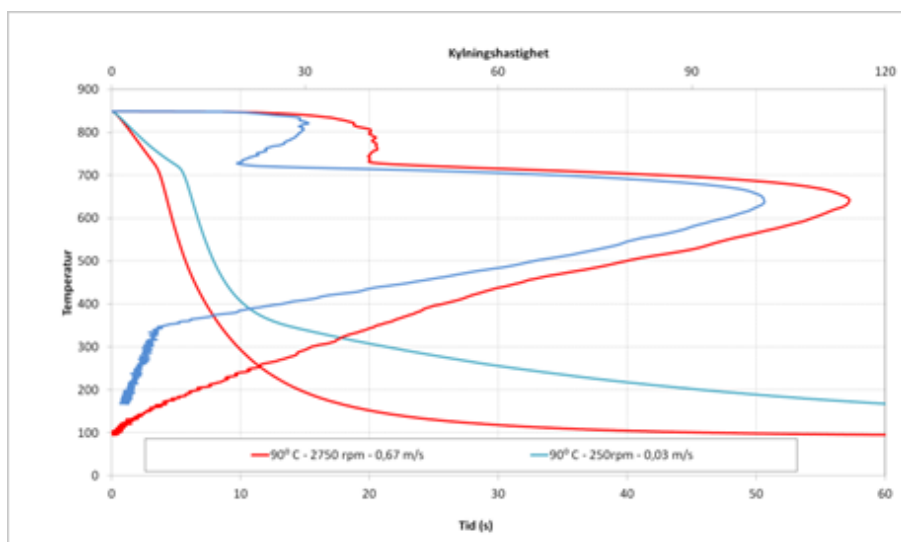
Uppkolningsdjup/Härd djup Genom att ansätta materialdata för olika kolhalt i modellens ytzon kan effekten av härd djup på formförändring beräknas. Modellerna anpassades så att härd djup på ca 1 mm och ca 1,5 mm erhöles.

Härdbarhet Fasomvandlingskinetik för två olika stålsorter 20NiCrMo5 (156L) och 18CrNiMo7-6 (159) användes som indata för de metallurgiska beräkningarna, se även Figur 8 som visar de båda stålsorternas CCT-diagram.



Figur 8 CCT-diagram som användes i beräkningarna för stålsorterna. Vänster) 156L (20NiCrMo5) och höger) 159 (18CrNiMo7-6).

Kylningshastighet Värmeövergångstal för två olika strömningshastigheter, 0,02 m/s och 0,67 m/s, togs fram som baserades på uppmätta kylkurvor, se Figur 9. Oljan som användes var Isorapid 277 HM och oljans temperatur var vid provningen 90 °C.



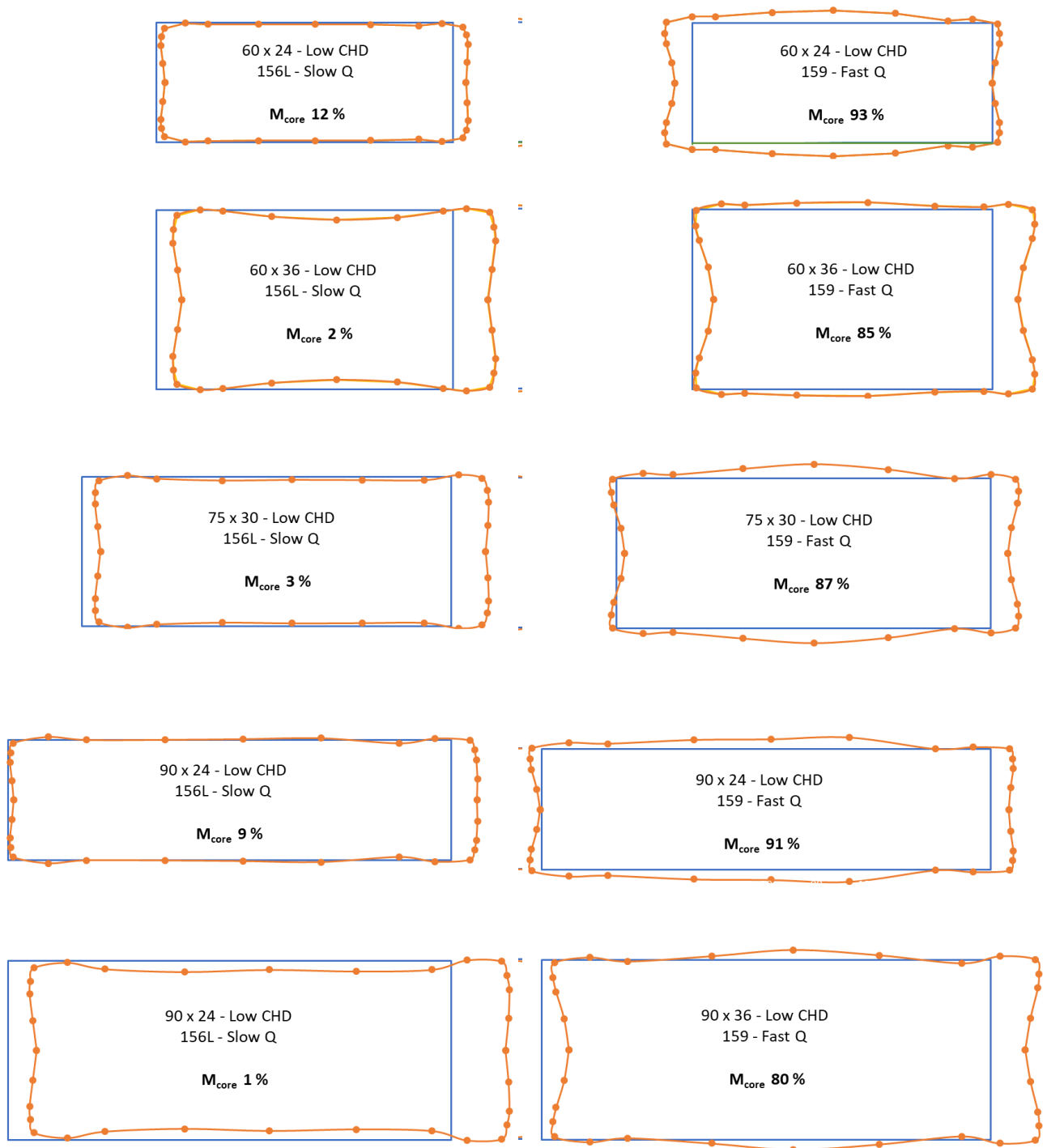
Figur 9 Kylkurvor för härdolja Isorapid 277 HM vid 90 °C med 0,02 m/s och 0,67 m/s i strömningshastighet.

Tabell 1 DoE-plan med faktorer och deras nivåer som beräknades.

Faktor	Låg nivå	Hög nivå
Härd djup	1 mm	1,5 mm
Härdbarhet/Stålsort	156L (20NiCrMo5)	159 (18CrNiMo7-6)
Kylningshastighet	Låg (0,02 m/s)	Hög (0,67 m/s)

DoE-planen resulterade i totalt 80 beräkningar. Nedan visualiseras resultat för respektive ringtyp för de beräkningsfall som gav lägst och högst martensitomvandling i kärnan, dvs stålsort 156L med låg kylningshastighet och stålsort 159 med hög kylningshastighet, se Figur 10 och Figur 11. Vid låga nivåer av martensit i kärnan är den dominerande mikrostrukturen bainit med ferrit/perlitmängd i regel understigande ca 1 %.

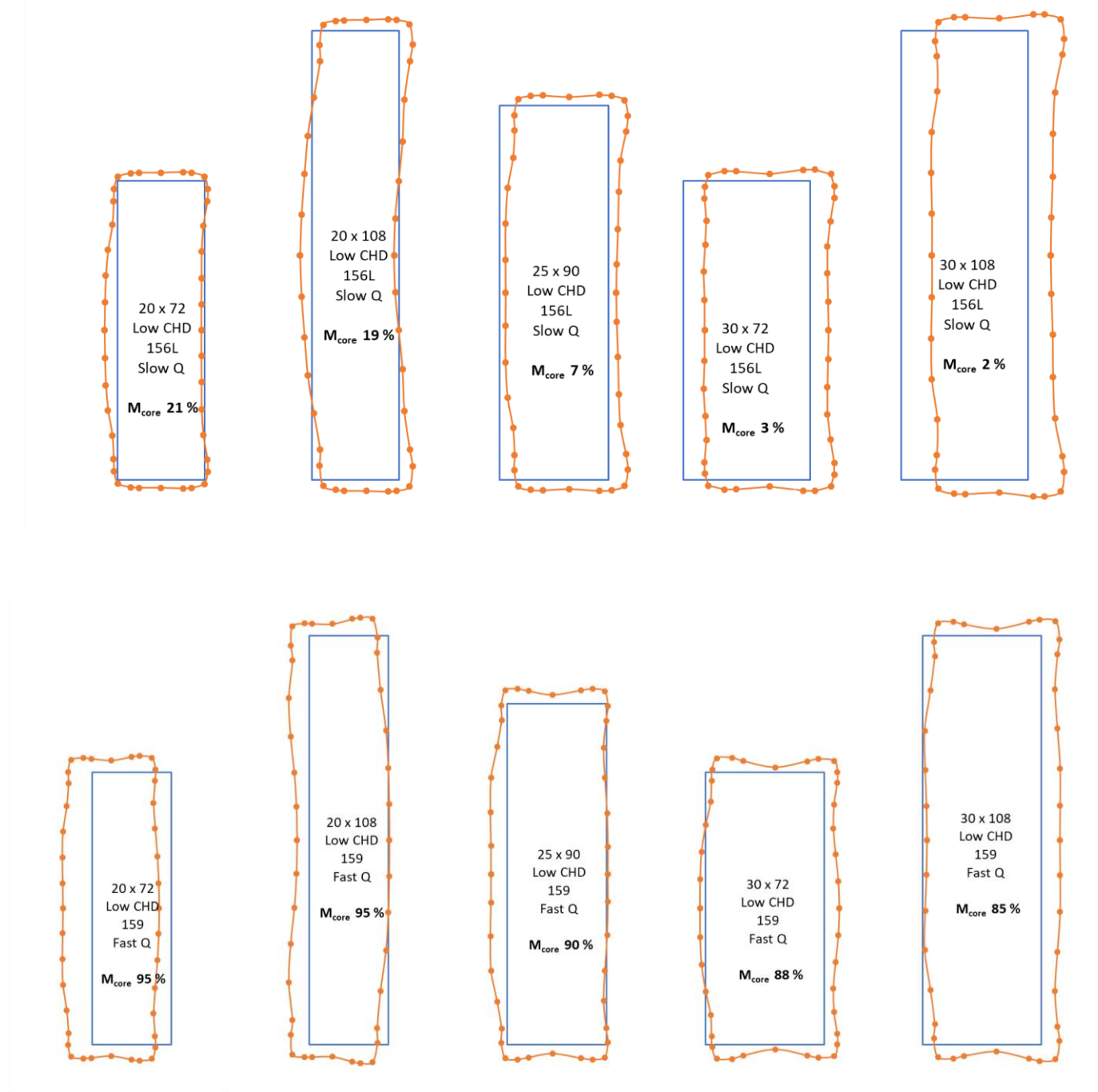
Det man också skall ha i åtanke då man studerar resultaten nedan är att den mängd martensit som fås i kärnan är en samverkans effekt av stålets härdbarhet, kylningshastighet och ringens tvärsnittsarea.



Figur 10 Formförändring för Platt ring, stålsort 156L med låg kylningshastighet och stålsort 159 med hög kylningshastighet, båda med lågt sätthärdningsdjup.

För Platt ring, se Figur 10 är det tydligt att graden av martensitomvandling, M_{core} , i kärnan har stor betydelse för hur tvärsnittet förändras vid härdningen. Låg grad ger dubbel timglasform medan hög grad av omvandling ger dubbel tunnform istället. Likaså påverkas förflyttningen av tvärsnittet av

graden av martensitombildning, där en låg grad ger en förflyttning utåt. Vid hög grad av omvandling är denna förflyttning mindre eller så sker en expansion även inåt och i höjdlid. Effekten av själva tvärsnittets geometri kan ses där ringar med hög höjd tenderar att ge ökning av både inner- och yttre diameter. Denna effekt är inte lika påtaglig för ringar med låg höjd.



Figur 11 Formförändring för Hög ring, stålsort 156L med låg kylningshastighet (över) och stålsort 159 med hög kylningshastighet (under), båda med lågt sätthärtningsdjup.

Även för Hög ring, se Figur 11, är det tydligt hur graden av martensitombildning, M_{core} , i kärnan har stor betydelse för hur tvärsnittet förändras vid härdningen. Låg grad ger tendens till timglasform medan hög grad av omvandling ger tunnform istället. Likaså påverkas förflyttningen av tvärsnittet av graden av martensitombildning, där en låg grad tenderar att ge en förflyttning utåt. Vid hög grad av omvandling är denna förflyttning mindre eller så sker en expansion även inåt och i höjded. Det har även framgått att ett större sätthärdningsdjup i viss mån motverkar inverkan av hur graden av martensitombildning påverkar ringform, och att denna effekt är större vid liten mängd martensit i kärnan (visas ej här).

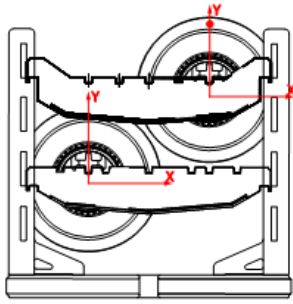
Det kan även ses hur själva geometrin påverkar formen, där slanka tvärsnitt, där kvoten Ringhöjd/Väggjocklek (Rh/Vt) är hög, ger en tendens till minskad innerdiameter. När Rh/Vt -kvoten minskar ses en tydlig tendens att ytterdiametern blir större. Denna effekt tycks vara oberoende av mängden martensit i kärnan. Slanka ringar har också en tydlig tendens för att ge konvex eller konkav form, vad det blir i slutändan beror på mängden martensit i kärnan. Dessa resultat står i ett visst motsatsförhållande till vad som observerades för den platta ringen.

AP2 i sammanfattning: Resultaten från Arbetspaket 2 har givit en mycket god förståelse för hur de grundläggande faktorerna, ringtyp och geometri, stålets hårdbarhet, härd djup och kylningshastighet påverkar form efter sätthärdning. Resultaten kommer framledes att digitaliseras för ytterligare förbättrad visualiseringsgrad.

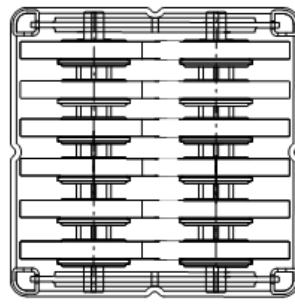
6.3 Arbetspaket 3: Värmebehandling

Uppvärmning: Uppkolning vid sätthärdning sker vanligtvis vid 920–950°C och uppvärmningen av chargen till den temperaturen är en faktor som kan påverka formförändring. En jämn och allsidig värmning av chargen, via successiv temperaturstegring (förvärmning) och god konvektion, bör hålla termiska spänningar vid ett minimum. Motsatsen är direkt chargering i varm ugn, vilket tillför den kalla chargen värme via strålning och då framförallt till ytor som är direkt exponerade för brännartuber/värmeelement. Det är även under uppvärmningen som eventuella restspänningar från tidigare processteg, t.ex. bearbetning, relaxeras och bidrar till formförändring.

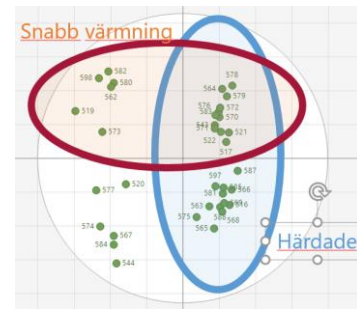
I projektet genomfördes en experimentell mätserie med syftet att studera hur värmningsförloppet till uppkolningstemperatur påverkar formförändringar. Försöken utfördes på ett huvudaxelkugghjul med en chargering enligt Figur 12 och Figur 13. Totalt genomfördes fyra försök: Snabb (1) respektive långsam (2) värmning med uppkolning och oljekylning. Snabb (3) respektive långsam (4) värmning med neutral atmosfär följt av luftsvälning över kylkar. Syftet med de två inledande försöken är att se effekten av värmningen med en normal härdcykel. Syftet med försök 3 och 4 är att renodla effekten av värmning och frikoppla den från formförändring vid härdning (uppkolning och kylning). Resultaten från försöken visade, som väntat, skillnad i formförändring mellan kugghjul som härdas (grupp 1–2) och luftsvälade (grupp 3–4). Mer intressant var att resultaten också visade på en tydlig skillnad i formförändring beroende på värmning, både för härdade och luftsvälade kugghjul. Det kan ses från Figur 14, vilket visar att fyra olika grupper kan särskiljas med multivariat dataanalys (PCA). Varje grön prick representerar formförändring hos ett kugghjul och dessa bildar fyra grupper som sammanfaller med försöksgrupperna 1-4.



Figur 12 Charge sedd från sida, notera kuggghjul på två spett.



Figur 13 Charge sedd ovanifrån, notera kuggghjul på två spett.



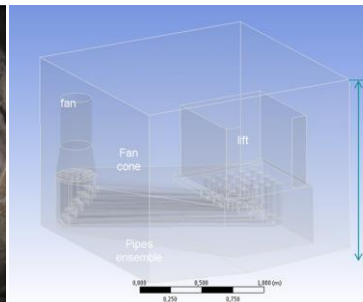
Figur 14 Formförändring för kuggghjul visade med multivariat dataanalys (PCA).

Oljekylning: Kylningen är det viktigaste processteget när det gäller formförändring vid sätthårdning. Kylningen måste ske med en viss hastighet för att man skall få föreskriven hårdhet i yta och kärna. Samtidigt bör kylningen inte ske snabbare än nödvändigt, eftersom man då får onödigt höga värme-spänningar och formförändringar. Kylningsintensiteten varierar från detalj till detalj i en charge, vilket ger en spridning i formförändringen som är svår att kompensera för. Variationen beror här dels av chargens utformning dels av härdkarets utformning.

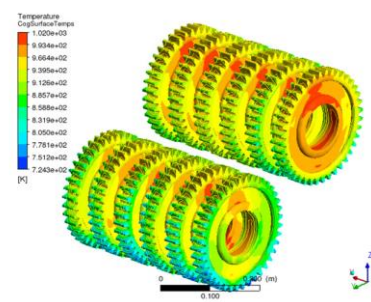
I projektet genomfördes en experimentell studie av ett kylkar parallellt med framtagning av beräkningsmodell enligt CFD. Kylkaret som studerades tillhörde en pusherugn och fungerar så att chargen sänks ned i ett hisschakt där oljan leds in genom botten via 25 tilloppsrör, se Figur 15. Oljeflöde vid respektive tilloppsrör bestämdes experimentellt via mätning med flödesmätare. Parallellt byggdes beräkningsmodellen utifrån ritningar av härdkaret; komplett med pump, rörsystem och hisschakt, se Figur 16. Experimentella mätdata av oljeflöden användes som indata till beräkningsmodellen. Beräkningsmodellen kunde i nästa steg användas för att simulera kylningen av en full härdbricka, se Figur 17. Pumpsystemet kunde sedan förbättras i modellen för att hitta ett jämnare oljeflöde kring komponenterna i chargen. Att nyttja beräkningsmodellen enligt denna princip är ett mycket kraftfullt verktyg för att hitta lämplig omkonstruktion av härdkaret. Projektresultatet var därmed ett förslag till omkonstruktion av härdkaret vilket lämnats vidare till komponenttillverkare för utvärdering och eventuell implementering vid framtida revision av härdkaret.



Figur 15 Inloppen för oljeflöde till hisschakt i pusherugn.



Figur 16 Modell av oljekylningstank med pump, rörsystem och hisschakt.



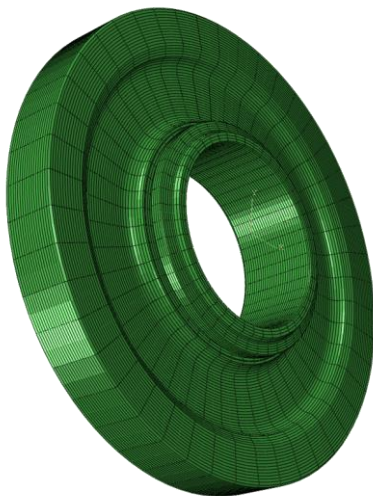
Figur 17 Resultat från CFD simuleringar av kuggghjul. Färgskalan visar Kelvin.

Hängande respektive liggande charging av kuggghjul: Hur kuggghjul chargerats har en inverkan på formförändringarna. Vanligast är att de chargerats antingen hängande på spett eller liggande på en fixtur. Krypprocesser under själva uppkolningen förefaller vara försumbara utan det är framförallt under kylsteget som skillnaderna uppträder. Det är två väsentliga faktorer som skiljer hängande från liggande charging: 1) Hängande kuggghjul doppas ner i oljan från ena sidan medan ett liggande

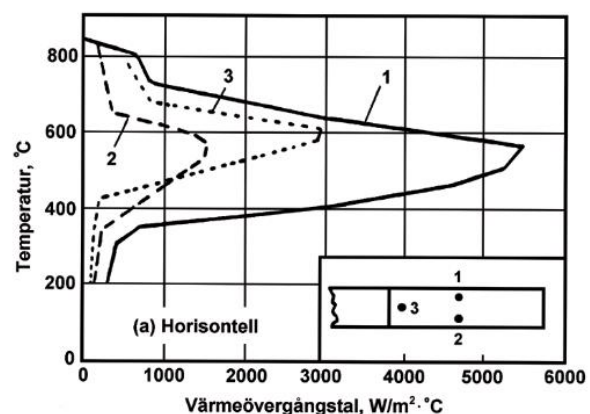
kugghjul blir helt nedsänkt i oljan i princip momentant. 2) Värmeövergångstal skiljer sig mellan över och undersida vid oljekylning (bl.a. beroende av sk ångfilmsbildning), något som kommer att inverka speciellt vid liggande charging.

Inom projektet genomfördes simulering av hängande respektive liggande charging. Simuleringarna utfördes med FE-programvaran Sysweld. Geometrin som användes var ett svarvämne från ett av Scantias sidoaxelkugghjul med diameter 256 mm, se Figur 18. Den färdiga kuggeometrin (med kuggar) simulerades inte, inte heller uppkolningen. Att ta med hela kuggeometrin vore ytterst tidskrävande. Simulering av svarvprofilen ger däremot en god bild av makroformförändringar som ovalitet, konicitet, planhet etc. Materialdata för Scantias stål 92506 användes. Dessa data hade räknats fram med mjukvaran JMatPro. Nedsänkningshastigheten i oljan är för det aktuella kugghjulet 200 mm/s. Simuleringar gjordes med samma värmeövergångstal på alla ytor för att renodla effekten av själva nedsänkningen. Med verklig nedsänkningshastighet, 200 mm/s erhöles ingen som helst skillnad mellan hängande och liggande hjul. Hastigheten är alltså så hög att hela kugghjulet kommer under ytan av oljan innan några väsentliga förändringar hinner ske. Minskas nedsänkningshastigheten kan dock skillnader mellan hängande och liggande simuleras, men detta beskriver inte det verkliga fallet. Simuleringar gjordes även med olika värmeövergångstal på olika ytor, se Figur 19. Dessa värmeövergångstal har uppmätts vid kylning av liggande ringar i stillastående olja. Resultaten visar inte på några stora skillnader vad gäller form mellan hängande och liggande charging. Formförändringen blir ungefär densamma och av samma storleksordning, dock får hängande charging en tendens till ovalitet. Planhetsfelet ser olika ut. Hängande charging ger chipsform, medan liggande ger tallriksform, se Figur 20 och Figur 21. Restspänningarna var dock markant lägre vid liggande charging.

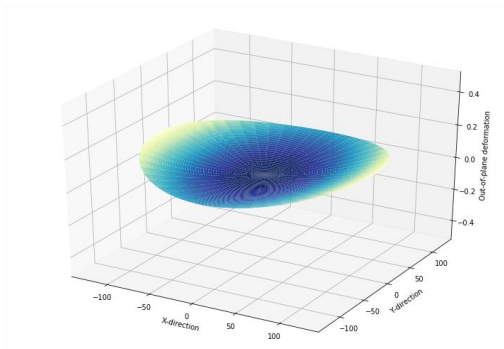
Det är troligt att dessa simuleringar inte helt fångat skillnader mellan hängande och liggande charging då de endast tar hänsyn till ett enskilt kugghjul och inte en hel charge.



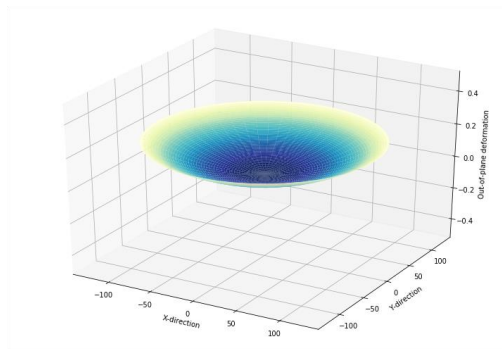
Figur 18 Simulerad geometri. Ytterdiameter 256 mm.



Figur 19 Värmeövergångstal för olika ytor vid liggande charging. Stillastående olja, X °C.



Figur 20 Planhet hängande hjul.



Figur 21 Planhet liggande hjul.

AP3 i sammanfattning: Projektet har inom arbetspaket 3 kunnat isolerat faktorn värmning och visat på hur den i sig själv ger upphov till formförändring. Vidare har projektet inom arbetspaket 3 genomfört en omfattande studie av ett enskilt kylkar där simulering och experimentellt arbete har kombinerats. Resultatet är en väl beskriven ny design av pumpsystemet vilken kan implementeras hos komponenttillverkaren.

Det har även påvisats att själva lastningsförfarandet, hängande eller liggande hjul, påverkar en sammansatt ringgeometri vid kylningen. Detta är viktig kunskap då det t ex kan innebära möjligheter att minimera formförändringsproblem vid nyanskaffning av ugnssystem och vid uppgradering av kylningssteget i värmebehandlingsprocessen.

6.4 Projektkomponent

Tillverkningskedjan för transmissionsdetaljer är omfattande med många komplexa processteg som var för sig kräver specifik kunskap, erfarenhet, kompetens och utrustning. Omfattningen innebär att tillverkningen sker i flera steg och innefattar flera företag. En grov uppdelning kan göras efter de företag som ingår i värdekedjan: ståltillverkning (stålverk), smide (smedja) samt bearbetning och härdning (komponenttillverkare), se Figur 3. För komponenttillverkaren medför den långa tillverkningskedjan en svårighet då flera inverkanseffekter förekommer tidigt i värdekedjan. Spårbarhet från tidigare processteg är därför avgörande för att kunna dra slutsatser om formförändringen som sker i ett av de sista processtegen, sätthärdningen.

För projektkomponenten som tillverkats av stålsorterna 92523, stränggjutet, respektive 258Q, götgjutet, har följande faktorer analyserats: valsgeometri (92523), smidesorientering (92523/258Q), glödning (92523/258Q), bearbetning (92523) och oljekylning (92523/258Q), se [Tabell 2](#). Endast de två senare faktorerna kontrolleras direkt av komponenttillverkaren. Respektive stålsort har hanterats som separata mätserier.

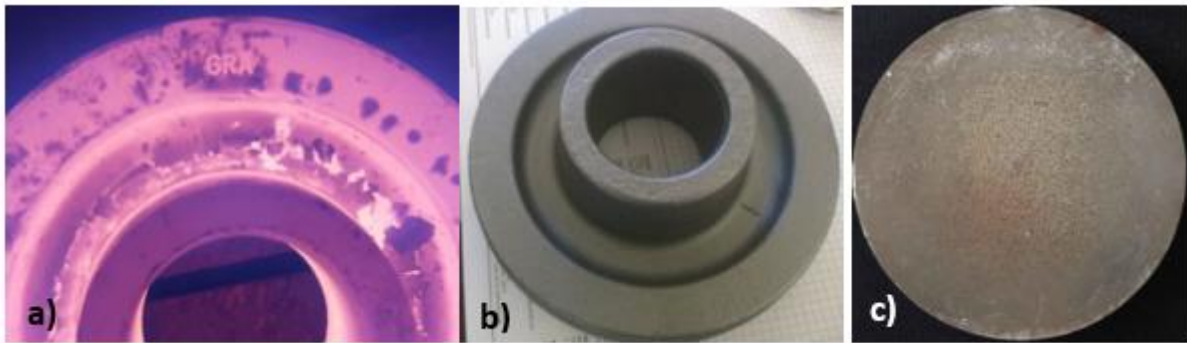
Tabell 2 Analyserade faktorer med respektive nivå för dom två mätserierna.

Faktor	Nivå*	92523	258Q
Valsgeometri	Rund (0) / Fyrkant (1)	X	n/a
Smidesorientering	Stående (0) / Liggande (1)	X	X
Glödning	Etappglödning (0) / Seghärdning (1)	X	X
Bearbetning	Snäll (0) / Tuff (1)	X	n/a
Oljekylning	Långsam (0) / Snabb (1)	X	X
Observationsparametrar	Nivå		
Grundkolhalt (vikts% C)	0,2; 0,205; 0,21; 0,215; 0,235; 0,255; 0,26	n/a	X
Lastposition	1-20	X	X (ej pos 3, 8, 13 och 18)

* På icke kvantifierbara faktorer/parametrar sätts ena nivån till 0 och den andra till 1 för att kunna beräkna korrelationskoefficienter.

Normalt sett förloras mycket av informationen kring tidigare processteg efter smidet då ämnena ser identiska ut oavsett stålsort, gjutmetod eller valsgeometri. För projektkomponenten säkrades spårbarheten med 3-ställiga bokstavskombinationer som stämplades på ämnet vid skäggningsoperationen, se Figur 22 a). Bokstäverna angav om stålet var götgjutet (G) eller stränggjutet (S), valsat runt (R) eller fyrkantigt (F) samt vilket stångID (A till L) ämnet smidits ifrån. StångID säkrade dessutom spårbarhet av smidesorientering, stående eller liggande, då det av praktiska skäl hölls oförändrat inom varje stång. Med stångID kunde även information om skillnader i grundkolhalt bibehållas ned på ämnesnivå. Kolhaltsvariationen på det götgjutna stålet, analyserad på alla 8 stänger genom förbränningsanalys varierade från 0,2 till 0,26 vikts% C.

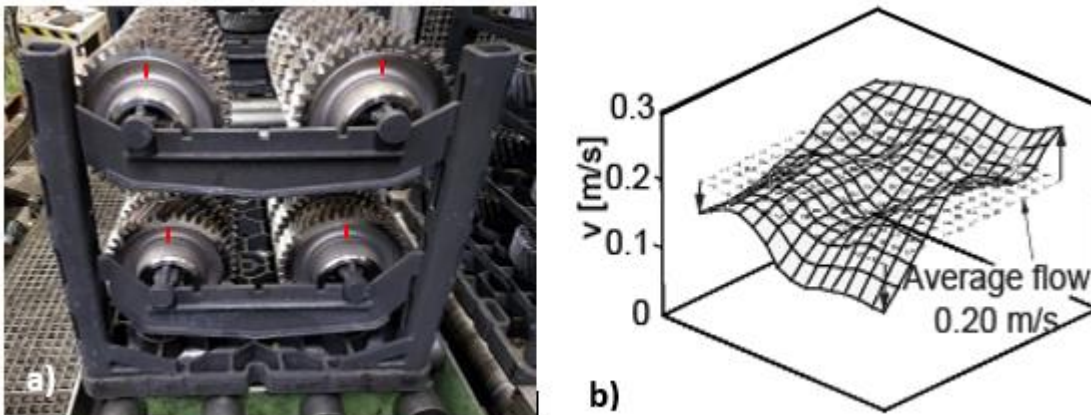
För att se eventuell inverkan av geometriska effekter från stålframställningen, exempelvis valsgeometri på stålsort 92523, så linjerades ett av smideskutsens hörn systematiskt mot ett urfräst spår i smidesverktyget. Spåret skapade ett bestående märke på smidesämnet, se Figur 22 b). Märket hade två syften, dels att visa vart smideskutsens hörn är orienterat i ämnet, dels att fungera som referens vid koordinatmätning och vid lastning på härdbricka. Även på de stänger som valsats runda kunde spårbarhet av hörn realiseras efter att först makroetsa utkapade tvärsnitt från stängernas båda ändar. Makroetsningen visade en tydlig rektangulär struktur, se Figur 22 b), varifrån hörnens läge kunde markeras på smideskutsen och används för linjering mot spåret. Att etsa stängernas båda ändar säkerställde huruvida rektangelns läge var oförändrad i stängens längdriktning. Spårbarhet av hörn var endast genomförbart för stående smide på stålsort 92523. Försök med makroetsning på stålsort 258Q visade ingen tydlig struktur.



Figur 22 a) Kodmärkning av ämnen för spårbarhet av ursprungsstång, ex. "GRA". b) Ämne med spår för orientering av smideskutsens hörn (ca kl 16 i bild). Spåret användes även som referens vid koordinatmätning och lastning. c) Makroetsat tvärsnitt från rundvalsad stång. En rektangulär struktur är synlig i mitten som indikerar hörnens positioner.

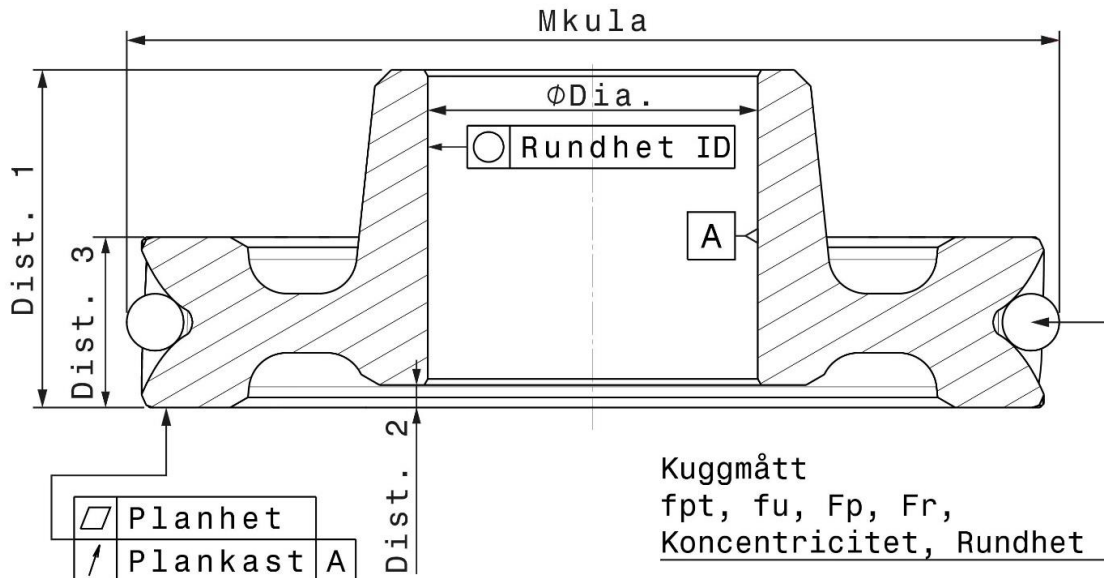
Bearbetningen gjordes i samma produktionslinje för alla grupper. På stålsort 92523 bearbetades hälften "snällt" och hälften "tufft" genom att ändra matning, skärhastighet och antalet övergångar. På 258Q bearbetades ämnena med "snäll" skärdata.

Härddningen skedde i en sätthärddningsugn av pushertyp med kugghjulen lastade hängandes, fördelade på 4 spett á 5 kugghjul/spett, se Figur 23 a). Totalt kördes 16 härdbriklar för 92523 serien och 8 härdbriklar för 258Q serien. Då några kugghjul saknades för fullastade briklar på andra serien används "dummies" för utfyllnad. Oljeflödet i härdkaret varierades på två nivåer genom att ändra omrörarens varvtal, 200 rpm respektive 1750 rpm. Det låga varvtalet motsvarar ett medelflöde av 0,2 m/s, se Figur 23, **det** höga varvtalet motsvarar ett oljeflöde av 1,6 m/s.



Figur 23 a) Kugghjul lastade på härdbricka. b) Oljeflödet i aktuellt härdkar för "låg" nivå.

Kugghjulens position på brickan noterades för att se eventuell skillnad beroende på lastposition. Kugghjulen mättes både före och efter härdning. Form- och dimensionsmått mättes med en Zeiss Accura koordinatmätmaskin, kuggmått med en Klingelberg P40. Formförändringen utvärderades som den skillnad i form-, dimensions- och kuggmått som skett under sätthärdning, $\Delta = \text{mått}_{\text{efter}} - \text{mått}_{\text{före}}$. Totalt utvärderades 5 dimensionsmått, 3 formmått och 6 kuggmått, se Figur 24.



Figur 24 Utvärderade egenskaper på projektkomponenten.

6.5 Resultat

En sammanställning av respektive faktors inverkan på formförändringen, i form av korrelationskoefficienter, finns i [Tabell 3](#) för kuggmått och [Tabell 4](#) för form- och dimensionsmått. Koefficienterna kan variera mellan - 1,0 och + 1,0. Ju större absolutvärde desto starkare linjärt samband. Värderna nära noll visar inget eller svagt samband. Tecknet framför korrelationskoefficienten anger om sambandet är positivt eller negativt. Ett positivt tecken innebär att förändringen i dimension-, form- eller kuggmått ökar då faktorn ändras från låg till hög nivå, på motsvarande sätt innebär ett negativt tecken att förändringen istället minskar. För att underlätta analysen så har cellerna färgmarkerats med en blå-vit-röd färgskala, ju starkare samband desto kraftigare färg.

Tabell 3 Korrelationskoefficienter för kuggddata.

Stålsort	Faktor	fpt vä	fpt hö	fu vä	fu hö	Fp vä	Fp hö	Fr	Koncen.	Rundhet
92523	Valsgeo.	0,05	0,05	0,00	0,01	0,04	0,04	-0,01	0,03	-0,05
	Smidesorie.	-0,11	-0,16	-0,15	-0,31	-0,08	-0,09	-0,02	-0,04	-0,05
	Glödgning	-0,23	-0,28	-0,08	-0,06	-0,19	-0,20	-0,19	-0,07	-0,09
	Bearbetning	-0,07	0,00	-0,04	-0,07	-0,05	-0,03	-0,02	-0,02	-0,06
	Kylning	0,41	0,51	-0,01	-0,08	0,50	0,54	0,53	0,66	0,04
258Q	Vikts% kol	-0,17	-0,04	-0,18	-0,04	-0,04	-0,01	0,01	-0,03	0,20
	Smidesorie.	-0,05	-0,06	-0,12	-0,10	-0,07	-0,03	0,12	0,03	0,24
	Glödgning	-0,16	-0,16	-0,12	-0,09	-0,29	-0,25	-0,20	-0,18	-0,01
	Kylning	0,44	0,54	0,00	0,12	0,59	0,71	0,76	0,78	0,14

Tabell 4 Korrelationskoefficienter för dimension- och formdata.

Stålsort	Faktor	Mkula	Dist. 1	Dist. 2	Dist. 3	Dia.	Rundhet ID	Planhet	Plankast
92523	Valsgeo.	0,01	0,06	0,12	-0,04	-0,10	-0,20	-0,07	0,03
	Smidesorie.	0,05	-0,12	-0,05	-0,09	-0,20	-0,50	-0,22	0,06
	Glödgning	-0,76	0,00	-0,14	0,94	-0,22	-0,16	0,13	-0,11
	Bearbetningg	-0,04	0,31	0,42	0,07	0,06	0,03	-0,07	-0,01
	Oljekylning	-0,53	0,65	0,30	-0,10	-0,79	-0,02	-0,20	-0,26
258Q	Vikts% kol	-0,74	0,49	0,43	0,55	-0,45	-0,02	-0,16	0,07
	Smidesorie.	-0,39	0,05	0,17	0,06	-0,32	-0,09	0,05	0,23
	Glödgning	-0,32	-0,20	-0,10	0,19	-0,19	0,02	-0,26	-0,10
	Oljekylning	0,07	0,46	0,09	-0,64	-0,68	0,05	0,23	0,40

Valsgeometri

Valsgeometrin kunde endast utvärderas för 92523 stålet. Den visar inga eller endast svaga samband. Minst svag inverkan indikeras för "Rundhet ID" med ett koefficientvärde på -0,20, med fördel för kvadratisk valsgeometri. Även statistiskt kan en skillnad ses (signifikansnivå $\alpha=0,05$), dock utan egentlig praktisk betydelse då medelvärdet endast skiljer 7 μm .

Smidesorientering

Smidesorienteringen visar relativt svag inverkan på formförändringen för nästan alla egenskaper. Noterbart är dock att samtliga koefficienter för kuggparametrar på 92523 visar negativa värden, från -0,02 till -0,31, det tyder på att liggande smide ger mindre formfel på kugg. Ett något starkare samband kan ses för "Rundhet ID" för stålsort 92523 med en korrelationskoefficient på -0,50. Uppmätta medelvärden är 0,047 mm för stående respektive 0,029 mm för liggande smide. Motsvarande korrelationskoefficient för 258Q är -0,09. Att sambandet är starkare för 92523 kan bero på en samverkans effekt som inte finns för 258Q. Den förmodade samverkans effekten är ett resultat av den systematiska linjeringen av gjutgeometrins hörn mot spåret i smidesverktyget. Linjeringen var endast praktiskt genomförbar på gruppen stående smide. Då spåret användes som referens vid lastning på hårdbricka innebar det att gjutgeometrins hörn kom att linjeras systematiskt åt samma håll även vid hårdning. För övriga grupper med slumpmässig orientering av hörn i ämnet så uppstod inte den potentiella samverkans effekten.

Glödgning

Glödningens inverkan på kuggparametrarna är svag men visar samma tendens. Samtliga koefficienter visar negativa värden för båda stålsorter, det tyder på att seghårdning är gynnsamt för minskade formförändringar på kuggparametrar. Ett starkt samband kan ses på stålsort 92523 mot två dimensionsmått, "Dist. 3" och "Mkula", samma tendens finns på 258Q men svagare. Seghårdning ger alltså relativt sett större kuggbredd, "Dist. 3", men mindre kuggdiameter, "Mkula", jämfört med etappglödning.

Bearbetning

Bearbetning, "snäll" och "tuff", genomfördes på stålsort 92523. Inga samband framkommer för kuggmått. För dimensionsmått indikeras två samband, 0,31 för "Dist. 1" respektive 0,42 för "Dist. 2".

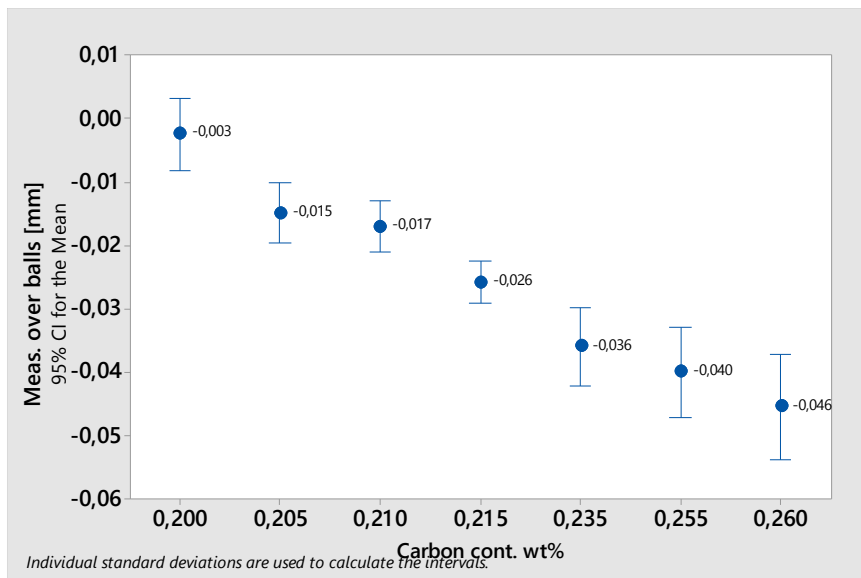
Kylning

Kylning var den faktor som hade störst inverkan på formförändringen. Snabbare (kraftigare) kylning ger sämre kuggparametrar. För båda stålsorterna ger snabbare kylning en minskad innerdiameter "Dia" och en ökad total tjocklek "Dist. 1". Däremot får kylningen olika effekter på kuggkransen för de båda stålsorterna. För 92523 så ökas kuggdiametern "Mkula" med liten förändring i kuggtjocklek,

"Dist. 3". För 258Q är förändringen den motsatta, kugghjulen är nästan oförändrad medan ökningen istället sker över kuggtjockleken.

Vikts% kol

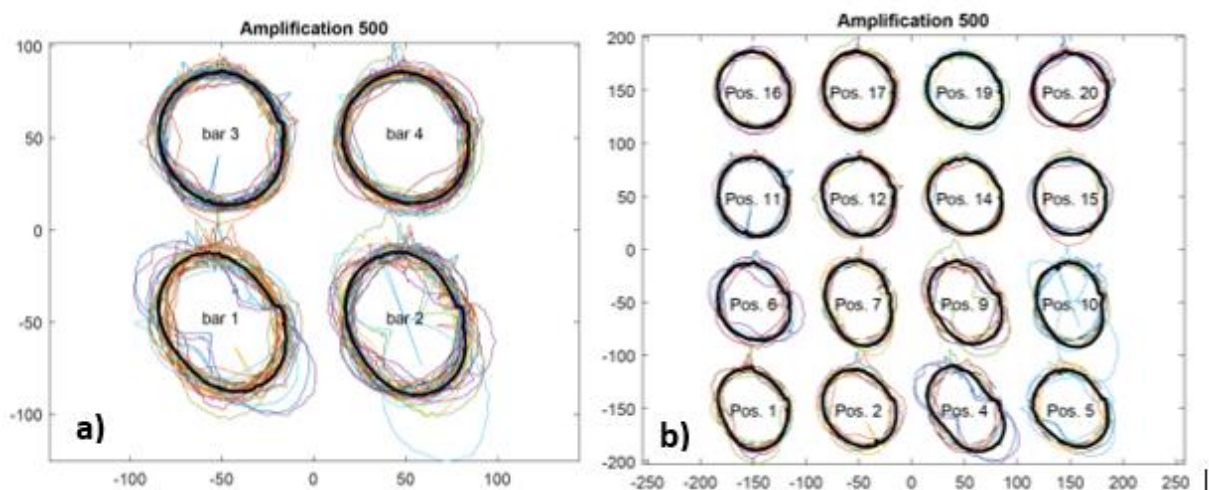
Kolhaltens inverkan på de fem första egenskaperna i tabell 3 är tydlig, där samtliga mått är dimensionsmått. Generellt får kugghjulen med högre kolhalt en mer sfärisk form, det vill säga att ytter- och innerdiametern minskar medan tjockleken i axiell led ökar. Sambandet mellan kolhalt och minskad ytterdiamter syns tydligt i Figur 25 där ökande kolhalt ger minskad ytterdiameter.



Figur 25 Kolhaltens inverkan på förändringen över ytterdiametern "Mkula".

Lastposition

För 258Q serien analyserades rundhetsfelet i förhållande till hur kugghjulen varit orienterade på spettet. Figur 26 a) visar att rundhetsfelet får en mer oval karaktär på undre spetten 1 och 2. En ytterligare uppdelning i respektive position, Figur 26 b), visar att några positioner blir kraftigt ovala, se till exempel pos 4 och 9. Rundhetsfelet är orienterade åt samma riktning, snett uppåt vänster.



Figur 26 a) Medelvärde för rundhetsfel för de olika spetten. b) Rundhetsfel uppdelade för respektive position.

Sammanfattning projektkomponent

Samtliga faktorer har inverkan på formförändringen. Några visar endast svaga samband såsom valsgeometri, smidesorientering och bearbetning. Starka samband finns för glödning mot några av egenskaperna, t.ex. kugghjulen och ytterdiameter. Starkast inverkan har kylningen där kraftigare kylning ger större formfel. Den höga spårbarheten har gjort att flera orsaker till formförändring har hittats, kvantifierats och systematiserats. Ett exempel är grundkolhaltsvariationens inverkan på

dimensionsmått. Ett annat är den systematiska vridningen av rundhetsfelet som visualiserats då kugghjulens position och orientering varit känd. Att arbetet med minimering av formförändringar är komplext framgår tydligt då faktorerna inte har samma inverkan på dom olika stålsorterna. Man kan inte dra slutsatser från en stålsort till en annan även om samma komponentgeometri används.

6.6 Arbetspaket 4: Utbildning, riktlinjer, checklistor

Ett utbildningspaket har tagits fram genom sammanställning av uppgifter från litteratur, projektresultat och erfarenheter från projektarbetet. Utbildningen är av halvdagsformat och består av 4 moment:

- Definition av formförändring vid värmebehandling
- Genomgång av begreppet Formförändringspotential (Distortion Potential)
- Hantering av och arbete med minimering av formförändringar
- Praktikfall: Formförändring av transmissionskugghjul – Aspekter i värdekedjan

Utbildningspaketet lanserades på projektets avslutningsseminarium som en del av dagen.

Utbildningen är initialt avsedd att användas av projektdeltagarna för intern utbildning där vid behov Swerim och RISE IVF kan bjudas in för att föreläsa. Som ett nästa steg kommer utbildningen även att lanseras utanför projektkonstellationen av Swerim och RISE IVF.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Resultaten från projekten bidrar till en väsentligt ökad kunskap både rörande tekniska aspekter på vad som påverkar formförändringar, hur dessa kan studeras och på vilket sätt arbete med att minimera formförändringar kan bedrivas.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Resultaten från de delar där olika beräkningsmetoder använts (CFD/FEM) visar på goda möjligheter för avancerade tekniska utvecklingsprojekt. Ett antal idéer för detta finns kortfattat belysta under rubrik 8 Slutsatser och Fortsatt forskning. Analys av stora datamängder inklusive spårbarhet och hur den kan säkras i en komponents värdekedja. Utveckling av smideståganalys t ex metodik för att utvärdera områden med krökt smideståga.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	I stort sett samma kommentar som i närmast ovanstående punkt. Framförallt är ett fortsatt arbete med enkla FEM-beräkningar för sammansatta geometrier i kombination med processuppföljning mycket intressant för produktutvecklingsprojekt.
Introduceras på marknaden	X	Diskussion pågår om när extern lansering av framtaget kurspaket kan ske.
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		Ej relevant

Resultaten tillsammans med i projektet uppkomna tankegångar/idéer kommer att kunna användas och vidareutvecklas inom de nyligen beviljade projekten "Transmissionskomponenter för elektrifierade drivlinor" (LIGHTer) och "Digitalisering av värmebehandling" (PiiA). Även för det sökta projektet "Flexibel implementering av nya stål för ökad komponentprestanda" (Metalliska Material) samt inom kommande projektansökningar och pågående samarbete inom konstellationen Swerim/RISE IVF/Värmebehandlingscentrum kommer resultaten få stor nytta.

7.2 Publikationer

Publicerad artikel

Olofsson, M. Köhn, S. Jonsson, Identifying process parameters influencing gear runout
Materialwiss. Werkstofftech. 2018, 49, 859.

Ytterligare en artikel planeras

Konferensbidrag.

A. Olofsson, M. Köhn, S. Jonsson, Identifying Influencing Factors from the Manufacturing Chain on Distortion of Case-Hardened Automotive Truck Gears, QDE2018, Nagoya, Japan

8 Slutsatser och fortsatt forskning

- Projektet har visat hur segringsbild/smideståga kan kvantifieras genom konventionella topografiska metoder (ISO 25178). Parametrar från standarden har använts för att karaktärisera bandning (Str), flytriktning (Std) och våglängd (Sal).
- Ett koncept för enkla och snabba FEM-beräkningar var mycket effektivt för väsentligt förbättrad förståelse av hur de komplexa samverkans effekterna mellan geometri, härd djup, härdbarhet och kylnings hastighet påverkar ett ringsegments formförändringspotential. I grunden är graden av martensit omvandlingen i ringen av stor betydelse. Hur denna sker är en samverkan mellan geometri, härdbarhet och kylnings hastighet. Denna effekt samverkar dock med härd djupet på så sätt att ett större sätthärdningsdjup i viss mån motverkar inverkan av hur graden av martensit omvandling påverkar ringform, och att denna effekt är större vid liten mängd martensit i kärnan.
- Projektet har kunnat isolera faktorn värmning och visat på hur den i sig själv ger upphov till formförändring där snabba värmningsförlopp kan ge större formavvikelser. Detta är en viktig kunskap att ha med sig då t ex nyinvesteringar eller ombyggnad av befintliga utrustningar planeras.
- Vidare har projektet genomfört en omfattande studie av ett enskilt kylkar där simulering och experimentellt arbete har kombinerats. Resultaten stämde väl med uppmätningar och kunde även korreleras mot uppmätta skillnader i form på ringar från olika positioner. Resultatet är en väl beskriven ny design av pumpsystemet vilken kan implementeras hos komponenttillverkaren.
- En ringformig transmissionskomponents formförändring beror också av dess positionering, sk charging, vid värmebehandling. Genom FEM-beräkningar går det att påvisa att dess form påverkas av om en ring hänger vertikalt eller ligger horisontalt. Hängande charging ger chipsform, medan liggande ger tallriksform.
- Samtliga faktorer har inverkan på formförändring för projektkomponenten. Några visar endast svaga samband såsom valsgeometri, smidesorientering och bearbetning. Starka samband finns för glödning mot några av egenskaperna, t.ex. kugghjulsbredd och ytterdiameter. Starkast inverkan har kylningen där kraftigare kylning ger större formfel. Den höga spårbarheten har gjort att flera orsaker till formförändring har hittats, kvantifierats och systematiserats. Ett exempel är grundkolhaltsvariationens inverkan på dimensionsmått. Ett annat är den systematiska vridningen av rundhetsfelet som visualiserats då kugghjulens position och orientering varit känd. Att arbetet med minimering av formförändringar är komplext framgår tydligt då faktorerna inte har samma inverkan på dom olika stålsorterna. Man kan inte dra slutsatser från en stålsort till en annan även om samma komponentgeometri används.

Fortsatt forskning

Områden som är intressanta för fortsatt forskning är:

- CFD-beräkningar visade sig vara en kraftfull metod för att ge förståelse för hur de komplexa sambanden under kylningen påverkar lokal strömningshastighet på periferin hos enskilda komponenter. Inom detta område är det synnerligen intressant att gå vidare med att ta fram ännu bättre data för hur värmeöverföringen sker i de olika faserna för oljekylning och då främst den sk ångfilmfasen där värmeöverföring sker främst via värmestrålning genom en ångfilm vars tjocklek varierar under denna fas. Modeller och indata för dessa behöver förbättras.
- Att gå vidare med strömningberäkningar även för gaskylning med höga tryck kommer att bli alltmer intressant då denna metod blir alltmer vanlig. Dessa beräkningar bör dessutom vara mindre komplicerade då gaskylning sker genom sk en-fasströmning genom hela temperaturområdet.
- Att koppla strömningberäkningar till termiska, metallurgiska och mekaniska beräkningar för en hel charge kommer på sikt att bli en kraftfull metod för att ännu bättre

minska/minimera effekten av de formfel som fås från kylningen och som beror av mindre lyckade utformningar av kylkar, gaskylkammare och komponentplacering.

- För en ännu starkare förståelse för designens inverkan på en komponents formförändringspotential krävs att man studerar även sammansatta geometrier, tex "hög ring"- "platt ring", "axel", "skiva" osv. Genom att på ett bra sätt planera beräkningsmatris och kombinera med produktionsuppföljning skulle detta kunna utgöra ett viktigt verktyg för att minimera formfel för nya produkter.
- Det är även intressant att på sikt på ett bättre sätt än vad som görs idag utnyttja, dvs digitalisera, all den in-data som loggas i dagens moderna ugnssystem (t ex takttider, lokala variationer i temperatur och ugnsatmosfär, ugnsluckeöppningar, väntetider till kylning, kylmedelstemperaturer) och koppla den till både materialets kemiska sammansättning från (materialcertifikat) och produktionsutfall avseende både på metallografiska/metallurgiska resultat och mätningar av form och dimension. Utmaningarna med denna metodik är flera; att spårbarheten genom processen i många fall är otillräcklig, datan ligger i olika system och att datans periodicitet skiljer sig åt i de olika systemen.
- Fortsatt arbete krävs för att utarbeta parametrar som bättre fångar smidestågans karaktär, jämfört med tillgängliga inom gällande topografistandarder. Vidare kan metoden för etsning sannolikt anpassas än bättre för topografimätning.
- För att ge komponenttillverkaren bättre förutsättningar att minimera formförändringar så måste spårbarheten förbättras genom hela värdekedjan. En försvårande omständighet, sett ur formförändringssynpunkt, är att högvolymsämnen oftast levereras från flera leverantörer med följden att olika tillverkningsvägar använts. På varje ämne bör det därför framgå vilka tidigare tillverkningssteg/processer och underleverantörer som använts i värdekedjan. Då skulle förutsättningarna förbättras avsevärt för att kunna dra korrekta slutsatser om faktiska skillnader. "Projektkomponenten" i FFIF har faktiskt visat att det är praktiskt möjligt med spårbarhet av hörnet från gjutgeometrin på ämnet. Med den informationen på kugghjulet är det möjligt för härderioperatören att minimera formförändringen genom att aktivt vrida in kugghjulet i en viss riktning för att t.ex. motverka hörneffekter. Ett projekt som ser över vilka metoder som finns för ökad spårbarhet och genomföra ytterligare försök för att se vilka vinster som kan göras skulle ha stor nytta i industrin.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Scania AB, Anders Olofsson

Volvo Group Trucks Operations, Kim Wallin

Volvo Construction Equipment, Mithaq Hanno

GKN Automotive, Köping, Burak Ocakli

Sandvik Mining & Construction AB, Peter Kolmskog

Parker Hannifin AB, Hossein Ghotbi (2016-2017)

Leax AB, Gustaf Makander

Atlas Copco Industrial Technique AB, Tommy Mattson

SwePart AB, Hans Andersson

Forgex Sweden AB, tidigare Componenta AB, Lars Bohlin

Ovako Sweden AB, Sven-Olof Ericsson

Bodycote Värmebehandling AB, Solmaz Sevim

Swerim AB, tidigare Swerea Mefos, Pavel Ernesto Ramirez Lopez

Swerim AB, tidigare Swerea Kimab, Sven Haglund

RISE IVF AB, tidigare Swerea IVF, Hans Kristoffersen

KTH, Stefan Jonsson

10 Referenser

1. Hammer, K. (1975). Eigenspannungen und Verzug von wärmebehandelten Zahnrädern. *Wiss. Z. TH Magdeburg* 15, 5 p 479-484
2. Tardío, J A; Juncoso, M. (1991). Influencia de los parametros de cementacion que inciden en la deformacion de engranajes. *Aplicacion del diseno de experimentos. Tratamientos Termicos*, dec 1991, p 44-55
3. Clausen, B et al. Identification of process parameters affecting distortion of disks for gear manufacture – Part 1: casting, forming and machining . IDE 2008, Bremen, Germany.
4. Zoch, HW. From single production step to entire process chain the global approach of Distorsion engineering. IDE 2008, Bremen, Germany.