



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

Realistisk verifiering av produktionsprocesser - Steg 1



Ragnar Larsson och Hans Kristoffersen
2014-10-12
Hållbar produktion

Innehåll

1. Sammanfattning.....	3
2. Bakgrund	4
3. Syfte.....	5
4. Genomförande.....	5
WPA - Inverkan av processparametrar på kronhjulstillverkning.....	6
WPB - En innovationsagenda för virtuell simulering av gjutjärnsbearbetning.....	6
WPC - Projektledning och administration	7
5. Resultat	7
WPA - Inverkan av processparametrar på kronhjul tillverkning	7
WPB: Modellering och simulering av bearbetning heterogena material	9
Bidrag till FFI-mål	12
6. Spridning och publicering.....	12
Kunskaps- och resultatspridning	12
Publikationer	13
7. Slutsatser och fortsatt forskning.....	14
8. Deltagande parter och kontaktpersoner	15

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

Det är en nyckelfråga för våra fordonstillverkare att känna av, samt ha förmågan att agera på, förändringar i marknaden när det gäller miljövänliga och lätta produkter. Speciella problem gäller förbättrad produktprestanda kopplat till behovet av att minska bränsleförbrukningen; det senare behovet är direkt kopplat till minskade utsläpp och smartare miljöpåverkan. En viktig möjliggörare för att åstadkomma allt detta är att utnyttja avancerade material och bearbetning via virtuell simuleringsteknik. Således har vi ett behov av att simulera produktionsprocesserna via prediktiva, kostnadseffektiva och robusta simuleringsverktyg.

I projektet studerar vi ett par viktiga frågor som rör realistisk verifiering av tillverkningsprocesser baserade på virtuella simuleringsverktyg. Frågorna involverar materialmodellering, materialvetenskap, experimentella och systemorienterade perspektiv på tillverkningsprocesser. Å ena sidan, avser frågorna simulering av bearbetbarhet av gjutjärnsmaterial och, å andra sidan, en system orienterad approach till värmeassisterade presshärtningsprocesser, som används för att styra den av processen inducerade distorsionen hos transmissionskomponenter. Vi fokuserar i projektet några steg fram mot den slutliga visionen om att tillhandahålla virtuella verktyg där alla tillverkningsprocesser kan testas virtuellt i datorn på ett realistiskt sätt.

Fixturhårdning används för att motverka formförändring av transmissionskomponenter. Orsaken till de i många fall osystematiska formförändringarna går att finna i lokala variationer i materialegenskaperna hos ämnet samt i tillverkningsprocessen. Resultatet är ökade kostnader för komponenttillverkare eftersom det kräver både slipmån och slipning för att åtgärdas. I det här projektet utvecklas en metodik för att analysera hur olika ämnesegenskaper och processparametrar påverkar formförändring vid fixturhårdning av kronhjul. En större del av projektet behandlar finita element simulering av härdförloppet, till vilket flertalet experiment har legat till grund. Syftet med experimenten har varit att klargöra hur kylförloppet sker i härdfixturen och på så sätt ta fram realistiska värmeövergångstal för simulering av härdförloppet. Simuleringsresultaten har utgjort basen till ett verktyg för prediktering av formförändringar, vilket tar hänsyn till stålets härdbarhet samt presstryck i härdfixturen. Slutligen har verktyget anpassats till individuella betingelser för olika leverantörer; ett arbete som bygger på en mycket omfattande produktionsuppföljning hos Scania.

För att karaktärisera bearbetbarhet hos heterogena gjutjärnsmaterial identifierade vi en innovationsagenda som omfattar relevant state-of-the-art för simulering av skärande bearbetning tillsammans med forskningsfrågor i numerisk simulering och experimentell metodik. Följande huvudkomponenter definierar innovationsagendan:

- Virtuellt strategi för simulering för gjutjärnsmaterial i 2D.
- En testbänk för experimentell kalibrering/validering kopplat till den virtuella simuleringstekniken.
- En strategi för parameteridentifiering av våra modellparametrar.
- Ett prototypverktyg för att prediktera bearbetbarheten hos arbetsmaterialet.

Som en utgångspunkt studerades mikrostrukturens variation hos gjutjärnsmaterial relaterat till skärande bearbetning. Observera att mikrostrukturen kan varieras med avseende på gjutjärnets nodularitet vid virtuell testning, varvid hela spannet av gjutjärnsmaterial från "gråjärn" till CGI och segjärn kan hanteras. Centrala modellutvecklingsfrågor för den virtuella testningen är "konsistent formulering värmegenerering vid stora deformationer och höga deformationshastigheter" och "formulering av materialskada och brott i samband kopplat till spånbildningen". Olika modeller har utvecklats med avseende på deras beräkningsrobusthet, å ena sidan, och, å andra sidan, modellernas prediktiva kapacitet. När det gäller den experimentella karaktäriseringen utvecklades ett 2D-test som beskriver en 2D-bearbetningssituation benämnt "the sliced cylinder concept". Detta experiment modelleras med simuleringstekniken för kalibrering/validering mot perlit och gjutjärn. Baserat på prototypverktyget genomför vi prediktioner av skärkrafter för en klass av gjutjärnsmaterial. I dessa prediktioner observerar vi t ex en kvalitativ reduktion av skärkraften då skärhastigheten ökas. Vi noterar även en ökning av skärkraften då mikrostrukturen närmar sig den för CGI-materialet. Det viktiga budskapet är att det är möjligt att göra virtuella variationer i gjutjärnsmaterial och sedan göra kvalitativa bedömningar av gjutjärns bearbetbarhet när det gäller skärkrafter. Den vidare implikationen från dessa resultat är att vi kan dra vidare slutsatser i termer av restspänningar, distorsion, ytegenskaper samt verktygsförslitning för den bearbetade produkten.

2. Bakgrund

En viktig faktor för konkurrenskraften i den svenska tillverkningsindustrin är att snabbt kunna realisera nya produkter, och samtidigt kunna utveckla tillverkningsprocessen på ett så effektivt sätt som möjligt. Det är också viktigt att upprätthålla och vidareutveckla tillverkningsmetoderna för att möjliggöra smart energianvändning genom "lättningskomponenter". Detta ställer höga krav på att använda avancerade höghållfasta material i bearbetningsprocesserna. Virtuellt simuleringsteknik av tillverkningsprocesser används ibland, jmf. Ahlström och Larsson [1]; Men det behövs mer forskning för att förbättra och möjliggöra denna teknik med avseende på tillverkning.

Sätthårdning innebär uppkolning av bearbetade komponenter i ugn vid 850-950°C, vilket resulterar i en förhöjd kolhalt i ytzone. Vanligtvis är det uppkolade ytskiktet mellan 0,1-2,0 mm djupt. Stålet ges då en kraftig härdning vilket avsevärt höjer sträckgräns, brottgräns och hårdhet. Egenskaperna står även i proportion till kolhalten, vilket ger en gradient av avtagande styrka och hårdhet mätt från ytan. Kärnmaterialet, som inte får någon uppkolning, behåller god seghet. Den färdiga komponenten får därmed optimala materialegenskaper lokalt för sin användning. Sätthårdning medför även formförändringar som uppstår värmebehandlingen. Den totala produktionskostnaden påverkas till stor utsträckning av hur formfelen kan förutsägas och kontrolleras. För att minska användningen av slipning och uppnå en kostnadseffektiv produktion är det viktigt att minimera faktorer som leder till formförändringar. Ett annat sätt är att via fixturhärdning motverka formförändring via pålagt tryck under härdförloppet. Detta är en vanlig metod vid härdning av slanka kugghjul, som t ex kronhjul.

När det gäller den viktiga skärande bearbetningen är kunskap om skärkrafter, spånform, temperaturer och den bearbetade ytans integritet (i termer av ytjämnhet och restspänningar etc.) en viktig förutsättning för att minska bearbetningskostnaderna och förbättra produktkvaliteten. Idag kan bearbetningsprocesser beskrivas på ett mycket mer realistiskt sätt med hjälp av virtuell simuleringsteknik, och den nuvarande forskningen involverar simuleringar av baserat på materialets mikrostruktur.

3. Syfte

Målet med projektet är att sprida och öka vår kunskap om kopplingen mellan processparametrar i produktionen och de slutliga produkttegenskaperna med hjälp av numerisk simulering kombinerat med tillhörande experimentell metodik. Vi utvecklar målsättningen genom att formulera forskningsfrågor om ”distorsion” och ”restspänningar” i samband med olika *värmebehandlingsprocesser* av kronhjul. När det gäller *skärande bearbetning* formulerar vi forskning kring simulering och prediktering av skärkrafter, inducerade vid skärande bearbetning av gjutjärnsmaterial. Centrala frågor i forskningen kring ”realistisk verifiering av produktionsprocesser” gäller materialmodellering och modellidentifiering; dessa frågor har identifierats som de viktigaste för att kunna möjliggöra simuleringstekniken. Vidare utvecklas experimentell metodik som är symbiotiskt kopplat till simuleringstekniken. De utkristalliserade forskningsfrågorna i tillverkningsprocessen är strategiska då nya, mer höghållfasta, material införs i tillverkningsprocesserna, vilket i sin tur är den viktigaste möjliggöraren av drivlinor med smart miljöpåverkan. Således är färdplanen ”2020 Hållbara tillverkningsystem för produktion av innovativa miljövänliga och säkra produkter” väl i linje med våra projektmål.

4. Genomförande

Projektet är uppdelat i tre arbetspaket (WPA, WPB och WPC) fokuserade enligt:

- WPA – fokuserat mot inverkan av processparametrar på drivlinekomponenter, med delmålen om att utveckla ett verktyg för att prediktera formförändringar. Verktyget är baserat på en kombination av processdata och geometriska data från presshårdade kronhjul och FEM-simulering (via mjukvaran Sysweld från ESI Group). Mycket arbete har lagts ned vid dataanalysen och med försök och analys av kronhjul för att bestämma värmeövergångstalen runt kronhjulet under oljekylningen i fixturhärldningsoperationen. Dessa är nödvändiga för att beräkna den kombinerade effekten av kylning och presstryck på formförändringar vid härldningen av kronhjul.
- WPB - fokuserat mot modellering och simulering av bearbetning av heterogena material. I detta arbetspaket ha vi utkristalliserat en innovationsagenda för att karaktärisera skärbarhet i gjutjärnsmaterial. Innovationsagendan omfattar nuvarande "state of art teknologi" för virtuell simulering av bearbetning med vidare forskningsfrågor om brottmodellering, materialskada tillsammans med en symbiotiskt kopplad experimentell teknik för karakterisering av heterogena material.
- WPC – fokuserat mot projektledningen och samordningen av aktiviteterna i WPA och WPB på projektmöten. Vidare fokuseras WPC mot kunskapsspridning från projektet via aktivt deltagande i internationella konferenser och publicering i internationella tidskrifter. Vi sprider även kunskaper inom landet genom av initiering relaterade teman, vid t ex den Katrineholmskonferensen, i syfte att stärka konkurrenskraften för den svenska tillverkningsindustrin i fråga om produktivitet genom ökad kompetens och medvetenhet om virtuell simuleringsteknik.

WPA - Inverkan av processparametrar på kronhjulstillverkning

För framtagning av verktyget för prediktion av formförändringar användes en kombination av geometri- och processdata från produktion, planerade experiment, FEM-beräkningar och multivariata metoder. Mycket arbete har lagts ned vid dataanalysen och med försök och analys av dessa för att bestämma värmeövergångstalen runt kronhjulet under oljekylningen i fixturhärldningsoperationen. Dessa är nödvändiga för att beräkna den kombinerade effekten av kylning och presstryck vid härldningen av kronhjul på formförändringar. Arbetet har skett i ett nära samarbete mellan högskola, industri och institut vilket var en viktig faktor för ett lyckat genomförande av projektet.

WPB - En innovationsagenda för virtuell simulering av gjutjärnsbearbetning

För att lösa och förstå det komplicerade problemet med att karakterisera skärbarhet i gjutjärn utvecklade vi en innovationsagenda. Innovationsagendan omfattar vårt aktuella läge när det gäller simuleringsmetodik för skärande bearbetning samt prioriterade forskningsfrågor i kring simulerings- och experimentella tekniker inriktade mot skärbarhet i gjutjärnsmaterial. Följande huvudkomponenter definierar innovationsagendan:

- Virtuell strategi för simulering för gjutjärnsmaterial i 2D.

- En testbänk för experimentell kalibrering/validering kopplat till den virtuella simuleringstekniken.
- En strategi för parameteridentifiering av våra modellparametrar.
- Ett prototypverktyg för att prediktera bearbetbarhet av arbetsmaterialet.

Som en utgångspunkt studerades mikrostrukturens variation hos gjutjärnsmaterial relaterat till skärande bearbetning. §Observera att mikrostrukturen kan varieras med avseende på gjutjärnets nodularitet vid virtuell testning, varvid hela spannet av gjutjärnsmaterial från "gråjärn" till CGI och segjärn kan hanteras. Centrala modellutvecklingsfrågor för den virtuella testningen är "konsistent formulering värmegenerering vid stora deformationer och höga deformationshastigheter", "formulering av materialskada och brott i samband kopplat till spånbildningen". Olika modeller har utvecklats med avseende på beräkningsrobusthet, å ena sidan, och, å andra sidan, prediktiv kapacitet. När det gäller den experimentella karaktäriseringen fattades ett aktivt beslut i konsortiet att begränsa till gjutjärnsmaterial. Som ovan antytts utvecklades ett 2D-test som beskriver en 2D-bearbetningssituation benämnt "the sliced cylinder concept". Detta experiment modelleras med simuleringsteknik för kalibrering/validering mot perlit och gjutjärn.

WPC - Projektledning och administration

Projektledningen omfattar formulering/uppfölning av "agendor" för de interna såväl som för de formella projektmötena. Genom dessa möten håller vi koll på det aktuella projektläget samt utvecklingen i projektgrupperna och konsortiet i förhållande till våra delmål. En genomsam diskarea för projektet har etablerats, där allt material som produceras och presenteras i projektet finns lagrat. För att få ett framgångsrikt projektresultat betonar vi vikten av engagerad projektledning, som uttrycker tydliga mål, förväntningar och delaktigheter som motiverar till aktiva deltaganden från olika miljöer, t ex inom Chalmers mellan tillämpad mekanik och material och tillverkningstekniks, samt mellan de intresserade industriella parterna.

5. Resultat

WPA - Inverkan av processparametrar på kronhjul tillverkning

En betydligt större förståelse för vad som påverkar formförändringar för sätthärdade transmissionskomponenter har erhållits genom att använda statistiska multivariata metoder för att utvärdera geometri- och processdata från produktionen. Viktiga randvillkor som behövs för att kunna genomföra termo-metallurgiska-mekaniska FEM-beräkningar har tagits fram genom försök i fullskala i den industriella anläggningen. I Fig. 1 visas den provdetalj som användes för att kartlägga kylningsförloppet. Den var framtagen i austenitiskt rostfritt stål för att undvika att fasomvandlingsvärme påverkade temperaturmätningarna i försöken, se Fig. 2. De flaggor som visas i Fig. 1 anger positionen för termoelementen. I Fig. 3 visas värmeövergångstalen för den aktuella

komponentens över- och undersida och som beräknats genom invers modellering med utgångspunkt från de uppmätta temperaturförloppen.

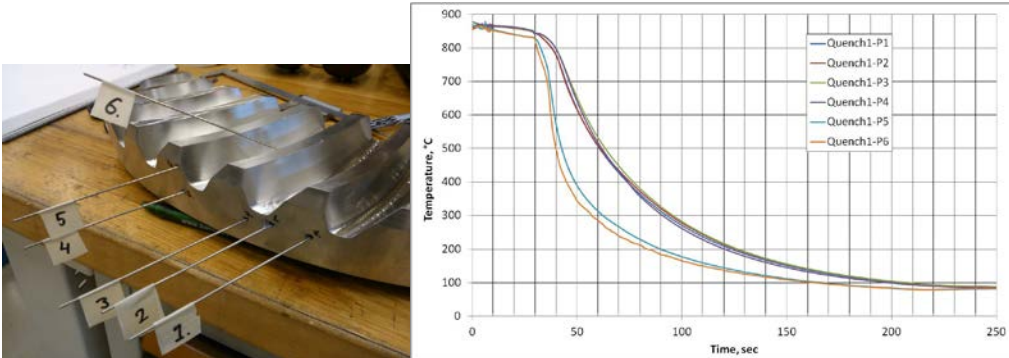
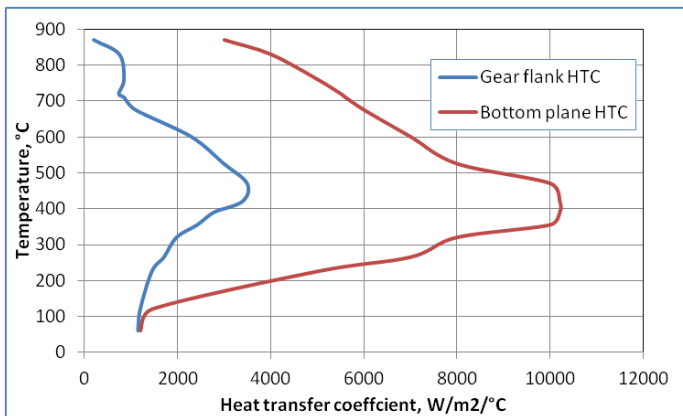


Fig. 1 Provkompnent för kylningsförsöket. Fig. 2 Temperaturkurvor upptagna för ett av kylningsförsöken.



Figur 3 Värmeövergångstal beräknade för komponentens över (gear flank) och undersida (bottom plane).

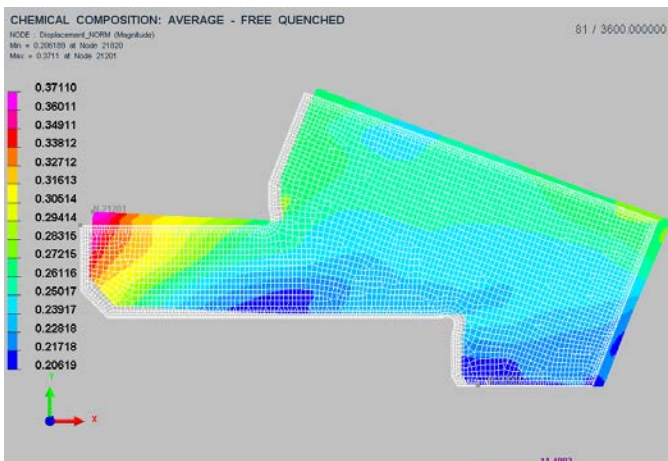


Figure 4 Normaliserad förskjutning och formförändring utan presskrafter. Formförändring förstörd 10x.

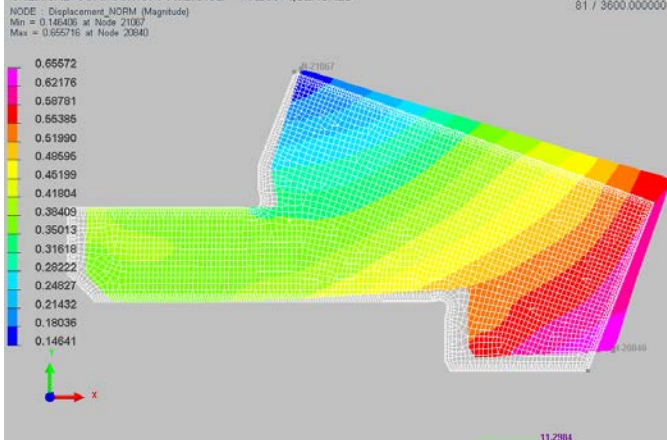


Figure 5 Normaliserad förskjutning och formförändring utan presskrafter. Formförändring förstord 10x.

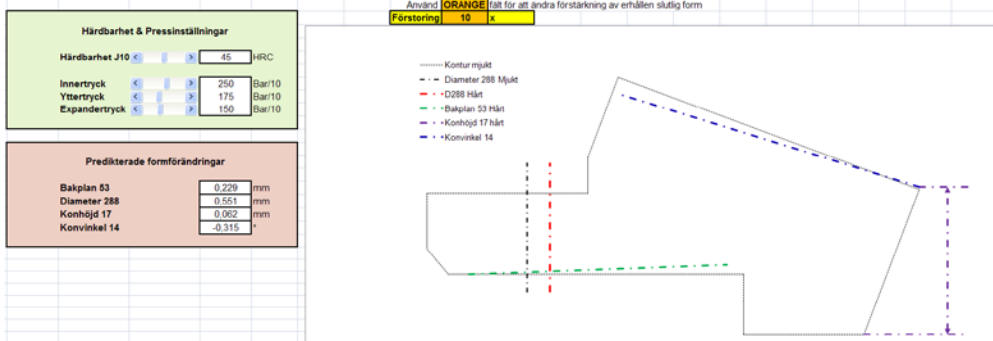


Figure 6 Kalkylarksbaserat beräkningsverktyg för prediketering av formförändringar efter fixturhårdning av kronhjul

I Fig. 4 och Fig. 5 visas skillnaden i formförändring för kronhjul där kylning skett utan pålagda presskrafter jämfört med kylning med maximal inställning på presskrafterna. I det framtagna verktyget är det möjligt att anpassa för smidda ämnen från olika leverantörer genom att utföra en försöksserie enligt DoE-konceptet i fixturhårdningsutrustningen och utifrån detta beräkna korrektionsfaktorer för de mått som är aktuella. Det framtagna verktyget visas i Fig. 6.

WPB: Modellering och simulering av bearbetning heterogena material

Enligt innovationsagendan för karakterisering av skärbarhet i gjutjärn sammanfattar vi de viktigaste resultaten av WPB enligt: 1) den virtuella strategin för 2D-simulering gjutjärn. I denna del karakteriserar vi mikrostrukturer i 2D via mikrofotografier för att identifiera mikrostrukturen i termer av nodularitet och gråmassans morfologi i materialet. Speciell teknik har utvecklats för att göra bilderna tillsammans med FE-diskretisering av mikrostrukturer för gjutjärn, jmf programvaran OOF2 i ref. [2]. Fig. 6 visar huvudstegen: Skapa mikrofotografier, FE-diskretisering och FE-analys. Centrala

modellutvecklingsfrågor för den virtuella simuleringsmetoden är konsistent formulering värmegenerering vid stora deformationer och höga deformationshastigheter, formulering av materialskada och brott i samband kopplat till spånbildningen. Olika modeller har utvecklats med avseende på beräkningsrobusthet, å ena sidan, och, å andra sidan, prediktiv kapacitet, jmf ref. [3]. En robust och effektiv modell har utvecklats, där olika sätt att beskriva materialskadeutveckling har undersökts, jmf [4,5]. Notera resultatet i anpassningen mellan den modellerade spånformen (som erhållits i simuleringen) jämfört med den experimentellt erhållna, jmf Fig. 7ab.

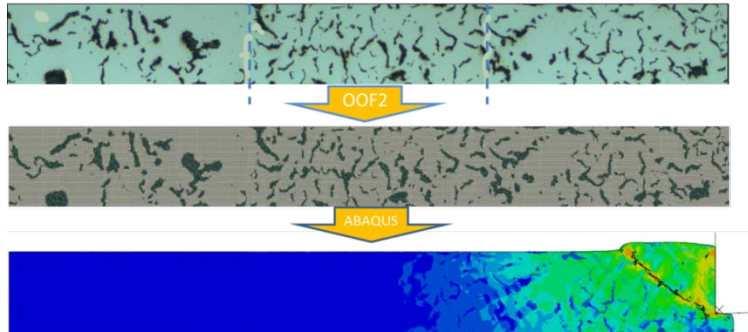


Fig. 7 a) FE-diskretisering från mikrofotografier och b) FE simulering av orthogonal bearbetning baserat på den FE-diskretiserade mikrografen.

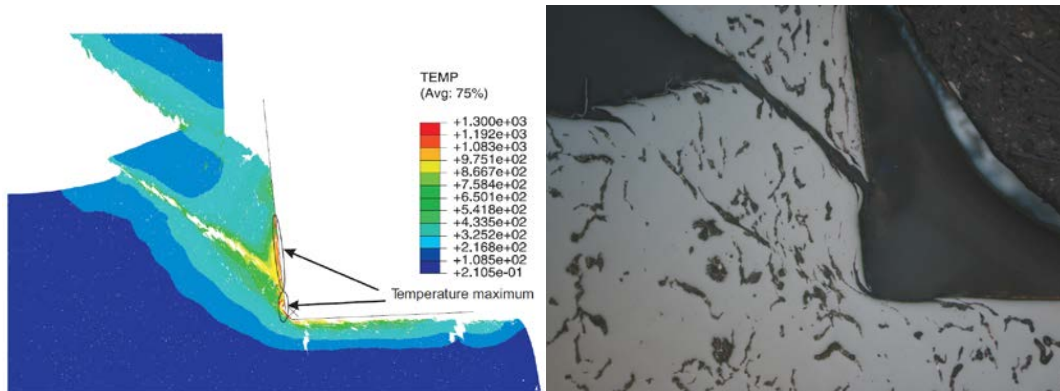


Fig. 8 a) En typisk temperaturfördelning samt erhållen spånform från bearbetningssimuleringen b). Observerad spånform från ett "quick stop" test.

En annan viktig del i innovationsagendan gäller 2) *den experimentella testbänken för orthogonal skärande bearbetning i symbios med virtuell simulering*. För att möjliggöra symbiosen mellan materialmodellering och materialkaraktärisering kopplat till robusta beräkningar utvecklade vi ett en testbänk för modellvalidering och ytterligare validering av bearbetbarheten hos arbetsmaterialet. Som visas i Fig. 8 föreslås konceptet med "sliced cylinder", där fokus ligger på skärkraftsmätningar samt att upprätthålla rätt skärhastighetsförhållanden, jfr Fig. 9a. En annan viktig del i "sliced cylinderkonceptet" är att tillse att skärkraftsmätningarna är utformade med hänsyn till strategin för 2D-simulering i den virtuella metoden.

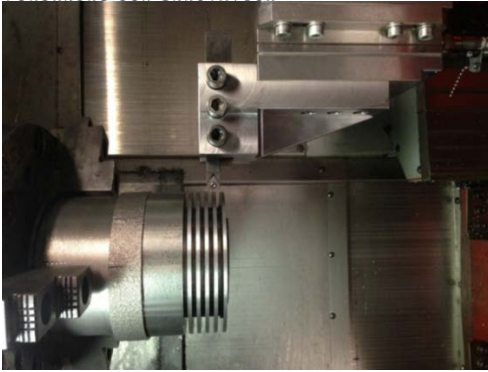
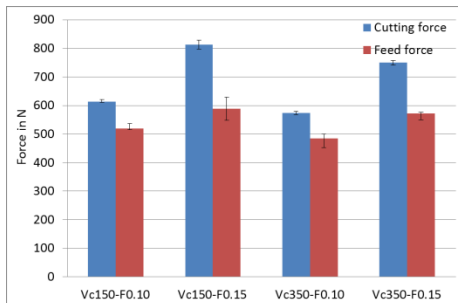


Fig 9. Utvecklad “sliced cylinder” testbänk för validering av bearbetbarhet av gjutjärn. Bearbetningen relateras till skär-, matningshastighet samt skärdjup.

När det gäller innovationsagendans 3) *parameteridentifieringsstrategi för modellparametrarna* utvecklade vi en invers metod, som baseras på det faktiska bearbetningsexperimentet i testbänken med kalibrering modellparametrarna, jmf ref. [6]. I denna utveckling anpassar vi de observerade skärkrafterna och spånformerna med materialparametrarna baserat på FE-analys. Nyckelingredienser i metoden involverar bearbetning i testbänken på ren perlit för parameterkalibrering och senare validering mot en klass av gjutjärnsmaterial.



CGI (C5)				
feed (mm)/speed (m/min)	D 100	D 110	D 120	Mean
0.1/150	290	284	282	285
0.1/350	295	278	282	285
0.15/150	337	351	393	360
0.15/350	321	379	365	355

Fig. 10. a) Uppmätta matnings- och skärkrafter vid CGI bearbetning i testbänken (C5 är en av provkropparna). b) Erhållna skärkrafter från virtuella simuleringar för olika matnings- och skärhastigheter.

Baserat på prototypverktyget utför vi 4) *predikteringar av skärkrafter* för en klass av gjutjärnsmaterial. Vi genomförde parameterstudier med avseende på variationer i nodulariteten hos gjutjärnet. Resultat från denna del av innovationsagendan visas i Fig. 9b, där invers FE-analys gjordes för att erhålla materialparametrarna *före* predikteringen i valideringssteget. Observera den erhållna kvalitativa reduktionen av skärkraften då skärhastigheten ökas. Notera också den kvalitativa ökningen av skärkraften med ökat skärdjup. Det viktiga budskapet från detta steg i agendan är att det är möjligt att göra kvalitativa bedömningar av skärbarheten baserat på virtuella variationer i nodulariteten i gjutjärnsmaterial.

Inom ramen för projektet har vi levererat utlovade virtuella verktyg och resultat i med arbetspaketeten: "påverkan av processparametrar på kronhjulstillverkning" (WPA) och "agenda för virtuell simulering av gjutjärn bearbetning innovation" (WPB). Resultaten i dessa WPn visar på möjligheten att variera viktiga tillverknings- och materialparametrar baserat på virtuell simulering. Därigenom får vi återkoppling till de resulterande komponentegenskaperna samt bearbetningsparametrar. På så sätt möjliggörs en större flexibilitet i produktionsprocessen via virtuell simulering, t.ex. designändringar och/eller optimeringar med avseende på material eller processparametrar. De fall som studerats och utvecklats är viktiga problemställningar i industriproduktionen som omfattar generiska discipliner som "mekanisk modellering", "materialvetenskap" och "systemteknik". De metoder som utvecklats inom projektet är således fast vetenskapligt grundade, vilket främjar den så viktiga "hållbarheten" även i metodutvecklingen.

Redan från projektetstart fokuserade projektet målen för hållbar produktionsteknik med inriktningen "virtuell process simulering". Detta är kanske den viktigaste möjliggöraren för kostnadseffektiva och robusta förändringar i produktionsprocessen, både med avseende på processparametrar samt hantering av nya material. Poängen är att mycket tid och pengar kan sparas med virtuell simulering i ett tidigt skede av tillverkningsplanering för t ex komponenter i blandade material jämfört med "trial and error metodik".

6. Spridning och publicering

Kunskaps- och resultatspridning

Inom ramen för projektet hade vi 9 projektmöten med representanter från alla partner i projektet. Från vart och ett av dessa möten har vårt state-of-the-art inom de olika arbetspaketeten definierats, diskuterats och lagrats på den gemensamma diskrean. Arbetspaketet WPB har delvis stötts från Chalmers styrkeområde produktion, där projektledaren (Ragnar Larsson) ansvarar för det aktiva fältet "process modeling and materials assessment ". Vi betraktar detta projekt som ett kärnprojekt inom Chalmers-MCR med inriktningen "virtuell teknik och simulering". Vi samverkar inom MCR kring projektet och sprider våra kunskaper både internt och externt. Således har vi fått en bredare spridning av projektets omfattning och projektresultat via interna seminarier och inom styrkeområde produktion, samt även egna initiativ till workshops. Nyligen initierade vi temat "Bearbetning - virtuell Teknik" vid "Katrineholmskonferensen" i maj 2014, där projektets state-of-the-art samt resultat presenterades under titeln "Innovativ virtuell teknik för gjutjärnsbearbetning ".

Resultaten från projektet har presenterats vid internationella konferenser, jmf refs [8-15], och tidskriftspublikationer, jmf refs [2-5]. Projektets delresultat har även presenterats vid inbjudna föreläsningar vid GAMM 2012 (Tyska mekanikdagarna) och vid MekIT 2013 (Norska mekanikdagarna). Arbetspaketet WPB har resulterat i en Tekn. Lic. examen,

Amir Malakizadi, jmfref [6], och en Tekn. Dr. examen, Goran Ljustina, jmfref [7], som i dag är anställd av VolvoCars motorfabrik som "Senior Tooling Engineer". Vi understryker även vikten av en aktiv projektledning, där delmål definieras, följs upp och successivt omdefinieras vid behov. Således ledningen en viktig faktor för att nå lyckat projektresultat, i synnerhet när olika projektdelar kopplas, människor och organisationer möts med rätt motivation för vidare kunskapsspridning av projektet.

Publikationer

1. J. Ahlström, R. Larsson. Modeling of Distortion during Casting and Machining of Aluminum Engine Blocks with Cast-in Gray Iron Liners. *Materials Performance and Characterization*, 9 (5) pp. 1–19.
2. G. Ljustina, R. Larsson, and M. Fagerström. A FE based machining simulation methodology accounting for cast iron microstructure. *Finite elements in analysis and design*, 80:1–10, 2013.
3. G. Ljustina, M. Fagerström, and R. Larsson. Hypo and hyperinelasticity applied to modeling of compacted graphite iron machining simulations. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 37:57–68, 2012.
4. G. Ljustina, M. Fagerström, and R. Larsson. Rate sensitive continuum damage models and mesh dependence in finite element analyses. Accepted for publication in *The Scientific World Journal*, 2014.
5. G. Ljustina, M. Fagerström. R. Larsson. Rate Sensitive Continuum Damage Models and Mesh Dependence in Finite Element Analyses, *MekIT'13 Seventh National Conference on Computational Mechanics*. s. 21-32. ISBN/ISSN: 978-82-321-0266-, 2013.
6. A. Malakizadi. Optimisation of Machining Operations by means of Finite Element Method and Tailored Experiments. Chalmers University of Technology. Lic Eng. Thesis, (2013).
7. G. Ljustina. Modeling of cast iron materials related to machining simulations. Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, 2013.
8. Larsson, Ragnar; Ljustina, Goran; Fagerström, Martin (2013) Rate Sensitive Continuum Damage Models and Mesh Dependence in Finite Element Analyses . 3rd International Conference on Material Modeling . s. 253. ISBN 978-83-89687-83-8
9. Ljustina, Goran; Fagerström, Martin; Larsson, Ragnar (2013) Rate Sensitive Continuum Damage Models and Mesh Dependence in Finite Element Analyses . *MekIT'13 Seventh National Conference on Computational Mechanics*. s. 21-32. ISBN 978-82-321-0266-2
10. Larsson, Ragnar; Ljustina, Goran; Fagerström, Martin (2012) Ductile dynamic fracture modeling using embedded discontinuities in CGI machining simulations . *proc. 83rd Annual Meeting of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics*.
11. Larsson, Ragnar; Ljustina, Goran; Fagerström, Martin (2012) Ductile dynamic fracture modeling using embedded strong discontinuities in CGI machining simulations. *ECCOMAS 2012*, Vienna University of Technology.

12. Ljustina, Goran; Fagerström, Martin; Larsson, Ragnar (2012) Hypo- and hyperinelasticity applied to modeling of compacted graphite iron machining simulations . European Journal of Mechanics - A/Solids, 37 s. 57-68. ISSN 0997-7538
13. Ljustina, Goran; Larsson, Ragnar; Fagerström, Martin (2012) Ductile dynamic fracture modeling using embedded strong discontinuities in CGI machining simulations . Proceedings of the 25th Nordic Seminar on Computational Mechanics.
14. Ljustina, Goran; Larsson, Ragnar; Fagerström, Martin (2011). Constitutive Modeling of CGI Machining Simulations. Computational Plasticity XI - Fundamentals and Applications. ISBN 978-84-89925-23-6.
15. Ljustina, Goran; Fagerström, Martin; Larsson, Ragnar (2011) Hypo- and hyperinelasticity applied to modeling of compacted graphite iron machining simulations . Proceedings of the 24th Nordic seminar on computational mechanics. s. 59-62. ISBN 978-952-60-4347-0 ISSN 1799-4896.
16. Mats Werke, Mikael Hedlind, Mihai Nicolescu; Geometric distortion analysis using CAD/CAM based manufacturing simulation; SPS 2014
17. Anders Olofsson, Presshårdning av kronhjul - beskrivning av nuläge och framtida hjälpmedel; KT-kluster-konferensen, Katrineholm 2013
18. Process modelling using upstream analysis of manufacturing sequences; Mats Werke,
19. Mats Bagge, Mihai Nicolescu, Bengt Lindberg; to be published in International Journal of Advanced Manufacturing Technology
20. Effect of Hardenability and Press Quenching on Distortion of Crown Wheels; Albin Stormvinter, Hans Kristoffersen, Anders Olofsson, Karin Biwersi, Sven Haglund; 5th International ASM conference of thermal process modelling and simulation (2014)
21. Development of prediction tool for press hardening of crown wheels - planned to be presented at IDE 2015.
22. Project report: Press quenching of crown wheels – Development of Prediction tool - Confidential

7. Slutsatser och fortsatt forskning

Inom WPA har ett koncept utvecklats för termo-metallurgiska-mekaniska beräkningar av fixturhårdning av kronhjul. Konceptet bygger på en förenklad 2D-axisymmetrisk geometri och experimentellt framtagna värmeövergångstal som anpassats till aktuell geometri. Ett predikteringsverktyg har tagits fram som beskriver hur stålets kemiska sammansättning och pålagda presskrafter samverkar avseende formförändringar efter fixturhårdning. Verktyget är baserat på en kombination av FEM-beräkningar och produktionsdata.

Inom WPB är huvudresultat den utkristalliserade innovationsagendan för karaktärisering av gjutjärns bearbetbarhet vid skärande bearbetning. Innovationsagendan omfattar nya resultat när det gäller materialmodellering, parameteridentifiering i materialmodeller

baserade på det utvecklade ”sliced cylinder konceptet”. Med hjälp av prototypverktyget inom innovationsagendan genomförde vi skärkraftsprediktioner för en klass av gjutjärnsmaterial. I dessa prediktioner observerar vi en kvalitativ reduktion av skärkraften då skärhastigheten ökas. Vi noterar också en erhållen kvalitativ ökning av skärkraft med ökande skärdjup. Det viktiga budskapet från dessa prediktioner i innovationsagendan är att det är möjligt att göra virtuella variationer i gjutjärnsmaterial och sedan göra kvalitativa bedömningar av gjutjärns bearbetbarhet när det gäller skärkrafter. Den vidare implikationen från detta är att vi kan dra vidare slutsatser från simuleringarna i termer av restspänningar, distorsion och ytegenskaper i den bearbetade produkten.

Framtida aktiviteter när det gäller värmebehandlingsprocesserna att komplettera verktyget med inverkan av götets form från stålverk och smidesprocessens påverkan. Detta kan ske genom att koppla kombinerade smides- och värmebehandlingsberäkningar, och i 3D studera ämnets sk smideståga. En viktig komponent i sådana beräkningar är att utveckla en metod för att kvantifiera smidestågans utseende och hur den förändras genom olika processteg från stålverk till färdig komponent. När det gäller skärande bearbetning är en självklar framtida utveckling är att fortsätta arbetet med innovationsagendan där framtida viktiga forskningsbehov identifieras avseende: Vidareutveckling av den FE-baserade parameteridentifieringsmetoden samt utveckling av en materialmodell som är okänslig för FE-nätet när det gäller duktila brott i segjärn. Dessutom behöver vi vidareutveckla innovationsagendan med avseende på utökad klass av material med industriell relevans.

8. Deltagande parter och kontaktpersoner

Deltagare i WPA har varit Hans Kristoffersen Swerea IVF, Albin Stormvinter Swerea IVF, Mats Werke Swerea IVF, Sven Haglund Swerea KIMAB, Johannes Gårdstam Swerea KIMAB, Stefan Jonsson KTH, Mihai Nicolescu KTH, Anders Olofsson Scania, Karin Biwerzi Scania, Mats Bagge Scania, Solmaz Sevin Bodycote Heat Treatment, Kristian Berggren EFD Induction. Deltagande parter i WPB har varit: Ragnar Larsson Chalmers - TM, Lars Nyborg Chalmers - MoT, Håkan Sterner VCC Skövde, Johan Ottosson AB Volvo.

Projektledare var professor Ragnar Larsson, Institutionen för tillämpad mekanik, Chalmers tekniska högskola.