Uthållig produktion av framtida motorkomponenter

Systemnivåanalys för bedömning av bearbetningsstrategier

Komponentlik i aluminium/gjutjärn för fräsförsök

Design för gjutning av platta prover för materialutveckling

Författare Lars Nyborg, Chalmers tekniska högskola (projektkoordinator)
Anders Jarfors, Rohollah Ghasemi, Jönköpings tekniska högskola (gjutning)
Andreas Archenti, Tigist Fetene, Adane KTH (bearbetningsstrategier)
Amir Malakizadi, Stefan Cedergren, Chalmers (materialens bearbetbarhet)

Datum 201512010
Delprogram Hållbar Produktion

Innehåll

Sammanfattning **3**

Executive summary **4**

1. Bakgrund **13**

2. Syfte, frågeställningar och metod **13**

3. Mål **16**

4. Resultat och måluppfyllelse **16**

5. Spridning och publicering **43**

7.1 Kunskaps- och resultatspridning 43

7.2 Publikationer 43

6. Slutsatser och fortsatt forskning **45**

7. Deltagande parter och kontaktpersoner **46**

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 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

Sammanfattning

Nyckelmaterial för avancerade motorkomponenter (motorblock, cylinderhuvud, etc) innefattar högpresenterande gjutjärn av olika slag och lättmetaller som aluminium. Projektet har utgått från utmaningar när det gäller gjutning och realisering av nya gjutjärn med hög hållfasthet och god skärbarhet, vägval avseende bearbetningsstragier samt materialbeteende i skärprocesser när det gäller bearbetning av kombinerade material och hantering av batchvisa materialvariationer. Ett nytt material (kisellegerat kompaktgrafitjärn) har kunnat demonstreras som alternativ för framtida motorkomponenter. Materialet har högre prestanda när det gäller hållfasthet än dagens gjutjärn och samtidigt bättre bearbetbarhet än tidigare kompaktgrafitjärn. Ny simuleringsmetodik för att hantera bearbetningsstrategier har introducerats. Metodiken bygger på systemdynamik och kan hantera komplexa problem. Forskningen har kopplats till fallstudier stegvis under projektet. Ett ramverk för val av maskinlösning för tillverkning av en specifik detalj har utvecklats. Vidare har projektet lett till generisk kunskap när det gäller arbetsmaterialens bearbetbarhet och särskilt när det gäller sammansatta material. Experimentella resultat har här förenats med en initial teknikplattform för simulering av skärprocessen i 3D. Inom detta område har också projektet ökat kunskapen hos underleverantörer i att bedöma materialvariationer och därmed ökat förutsättningarna för mindre och medelstora företag att driva hållbar produktion. Metodiken när det gäller att sätta materialmodeller för godtyckligt material via kontrollerade skärförsök i laboratorium är generell och kan tillämpas för nya material när deras bearbetning utvecklas. I samtliga fall har forskningen kopplats till utvärdering/validering med fysiska och/eller virtuella demonstratorer. Som ett led i strävan att sprida kunskap har även tekniseminarier redan etablerats via parternas nätverk. Detta kommer att byggas vidare på genom olika fortbildningsinsatser. Projektet har koordinerats genom Chalmers-MCR och övriga deltagare har varit KTH- DMMS, JTH, Swerea SWECAST, Volvo, Volvo Cars, Scania CV, SKF, Sandvik Coromant, BUFAB Lann, AGES/Värnamo Industri samt Sintercast. Projektet har lett till flera internationella publikationer, internationellt samarbete och flera examensarbeten. Vidare har projektet bidragit till att två doktorsexamina och en licentiatexamen kunnat åstadkommas.

Projektet har genomförts under perioden 2012-06-01 till 20151130. Total omslutning har varit 15.47 Mkr, varav 7.7 Mkr har utgjort stöd från VINNOVA.

Executive summary

Background

The development and use of high performance powertrain components is crucial for the performance of different vehicles. Key materials for engine components (such as engine blocks, cylinder heads, etc) include materials such as cast irons of different grades as well as light metals as aluminium. For car engines, the aluminium is often combined with other metals as in the case of cast aluminium engine block with cast iron cylinder liners. For heavy truck diesel engines, current and future expected solutions are based on cast irons. Legislation and requirements for lower emissions and improved efficiency ask for higher pressures and temperatures and thus increasing demands on material performance in both cases. The downsizing of engines with preserved demands on performance adds to this scenario. From a manufacturing point of view there are three apparent issues:

First, it is important to investigate how to cast closer to desired geometry – i.e. near net shape processing and ii) to optimizate mechanical and thermal properties by control of graphite morphology and matrix by novel alloying with e.g. Si.

Second, it is important to understand how manufacturing strategies with respect to pre-selected performance criteria should be set for optimization of line concepts, key operations, novel machining approaches and characterization of machining systems for increased efficiency as well as machine and process capabilities.

Third, it is important to have means of assessing the machinability of current and future materials used in engine components including i) measures for production development and batch-to-batch evaluation and ii) more elaborate, but efficient, methodologies to ascertain work material behaviour in metal cutting via tailored machining tests and modelling. Of particular importance is also to better understand how ***combined materials structures*** should be machined in efficient ways.

Project Definition and Objectives

The project goals defined were set based on the identified challenges within the areas of casting, manufacturing strategies and machinability of work materials.

<u>In the case of casting</u>, the objective has hence been to demonstrate the potential of using solution-hardened (silicon-alloyed) compacted graphite iron as candidate for engine components. This objective has been addressed through two activities; one focusing how to achieve robust microstructure control and one how to achieve certain mechanical properties combined with good dimensional control. Interaction of Si within compacted graphite iron (CGI is complex and not fully understood. More research is needed to clarify the solution hardened CGI capability, involving casting issues, examination of mechanical and thermal properties.

<u>In the case of machining strategies</u>, the objective has been to have a unified concept for the assessment of the machining strategies based on pre-defined criteria. The conceptual basis for this has been a holistic view for the integration of critical processes and components machining. Here, how to analyse and handle sources of variation and their impact on variation in production has been included. The approach has involved the application of system dynamics and modelling.

In the case of machinability of materials, the objective has been to clarify how material variation with respect to different conditions/scenarios. In one case the inherent material variation problem when machining combined materials has been addressed, dealing with the milling of aluminium engine blocks with cast iron liners and the turning of parts with both hard and soft steel microstructures. In another case, the potential effect of batch-to-batch work material variations has been at focus. For these materials-related issues, one aim has been to establish generic knowledge and methods that provide the basis for further development of methods that could be tailored for industrial use. Here, laboratory tests and 2D Fe-modelling of the cutting process have been combined for development and validsation of material models. Then, tailored machining tests with prototypes (demonstrator work-pieces) have been combined with 3D FE-modelling for process studies and optimisation. Furthermore, another aim has been to develop better understanding how material certificates shall be interpreted and how incoming work material shall be considered in order to maintain robust machining.

Project Constellation and Organisation of Work

The project has integrated the R&D challenges for Scania CV, Volvo and Volvo Cars as well as those of SKF, BUFAB Lann, AGES/Värnamo Industri and Sandvik Coromant. Sintercast has also joined. The project has involved the research environments Chalmers-MCR, KTH-DMMS and Casting Innovation Centre (Jönköping University and Swerea SWECAST) in a joint effort and it has taken advantage of basic efforts within the strategies initiatives in Production at Chalmers and KTH.

The project has been organised into the three main workpackages Casting (WP1), Machining (WP2) and Demonstration (WP3). The WP1 has been divided into the tasks Microstructure Control of Solution Hardened CGI (WP1.1) and Mechanical Properties of Solution Hardened CGI (WP1.2). The WP2 has been divided into the tasks Machining Strategies (WP2.1) and Machinability of Work Materials (WP2.2). In the end, the WP3 has been integrated with the other WPs and been executed as natural continuation of these involving the transfer of work connected to physical and virtual demonstrators.

The project was started June 2012 and completed 30 November 2015. The total financial framework has been about 15. 47 Mkr, whereof 7.7 Mkr has been supported by VINNOVA within the FFI-subprogramme Sustainable Production. The project has been co-ordinated via Chalmers MCR (Metal Cutting Research and Development Centre).

Main Technical and Scientific Results

Below the main results of the project are summarized, divided into the areas Casting, Machining Strategies and Machinability of Work Materials.

Casting

When it concerns microstructure control of Si-alloyed CGI, the workhas been focused on the nucleation of graphite and role of alloying elements and trace elements. Following a literature survey, the materials design has been settleed and specific gasting experiments were accomplished involving i) casting melt treatment by the Sintercast method at Swerea SWECAST and ii) casting using the Volvo method at Volvo. In both cases, plate specimens as well as compont-like test pieces (test piece developed in former FFI-project Optima 2). The target Si-levels for different variants were 3.7, 4.0 and 4.5 wt%, with balanced carbon

levels to maintain the carbon equivalent. The castings were succesful and fully ferritic matrix with compacted graphite was achieved provided that the dimension was large enough combined with sufficient Si-level, see summary in Tables A and B.

Table A. Summary ocf casting of Si-alloyed CGI variants at Swerea SWECAST

	Thickness (mm)	Nodularity (%)	Nodule count (nodule/mm²)	Pearl (%
Low-Si (3.7 wt.%)	7	38	185	<10
	15	18	71	<10
	30	9	46	<5
	50	5	42	<3
	75	7	61	<1
Medium-Si (4.0 wt.%)	7	46	231	<5
	15	15	83	<5
	30	7	46	<5
	50	5	41	<1
	75	6	60	<1
High-Si (4.5 wt.%)	7	39	222	<1
	15	16	90	<1
	30	14	80	<1
	50	6	55	<1
	75	8	58	<1

Table B. Summary of casting of Si-alloyed CGI at Volvo

	Thickness (mm)	Nodularity (%)	Nodule count (nodule/mm²)	Pearlite (%)
Medium-Si (4.0 wt.%)	7	55	205	<5
	15	19	48	<3
	30	7	12	<3
	50	7	17	<1
	75	9	20	<1
High-Si (4.5 wt.%)	7	62	201	<1
	15	30	67	<1
	30	12	24	<1
	50	15	40	<1
	75	11	26	<1

The next step was to investigate the possibility of controlling the mechanical properties of the Si-alloyed CGI. This was addressed in two stages. First, theoretical basics were reviewed via a literature study to find out appropriate Si-level (as well as levels of other elements) with respect to strength and ductility characteristics. Then, the mechanical properties were determined for the different variants manufactured at Swerea SECAST and Volvo. Results are summarized in Figure C by comparing the data for the medium and high Si-alloyed CGI variants to those of pearlitic CGI (as reference at 100%). Both Si-alloyed variants show better mechanical properties than the reference, the pearlitic CGI. The thermal conductivity (which is an important parameter) was shown not to correlate significantly with the Si-level.

Figure C. Comparison of mechanical properties of Si-alloyed CGI with those of pearlitic CGI for corresponding cast plate geometries (cooling rate, etc). 100% represents data for the pearlitic CGI.

Preliminary work was done as part of the development of a virtual demonstrator for prediction of mechanical properties and distortion for cast part. och simulering av egenskaper. The Design Expert software was used for future implementation of correlations in MagmaSoft. The correlation between tensile strength, and the parameters Si-level, nodularity and pearlite content was derived. Correlation betwwen real and modelled data was indicated.

Machining Strategies

Within this activity, new methodology for performance analysis been developed that can be used for evaluation machining strategies. The methodology involves the application of systems dynamics and and modelling-based approach. The methodology has been applied on the manufacture of engine blocks at Scania CV as validation study. The methodology addresses how machine system parameters for the machining process interacts, how such interaction drives performance and how new target values affect the machine and process parameters. More specifically, the benefit is found in the potential for improved performance with respect to choice of manufacturing strategies. In the case in question, the studies have addressed the comparison of existing transfer line and flexible machining centre line. The comparison can be done on system level or process level. In the former case, a holistic approach is applied where all operations are placed inside the box and details for each station are not considered. In the latter case, each station is addressed on individual basis whereafter output from the line can eventually be evaluated.

To select critical operations for analys, the methodology according to Figure D has been applied.

Figure D. Methodology for selection of critical operations for process level analysis.

In order to establish models for the manufacturing concepts, a policy analysis has been developed and applied. A generic model has been settled via the development of a conceptual map (c.f. Figure E) and then by an interaction analysis when it concerns machine system parameterd and critical performance criteria on both aggregated and detailed levels. For the case studies, the order rate (demand) has constituted the source for variation in the manufacturing.

Figure E. Conceptual map for correlation between machine system parameters.

With the methodology set, different case studies have been analysed involving various scenarios. When considering selection of machining strategy for future demands connected to performance criteria, scenarios include a model for existing production and a model for the policy analysis for limits of machining parameters in relation to demand. When considering, different demands in coarse milling, different scenarios as in Table B were addressed. In general, the methodology has proven to capable of providing information of potential practical use. To illustrate results, the comparison between the use of two different special purpose machines is shown in Figure F, from which it is found that the varinat SPM2 woudl give higher part costs for all scenarios.

Table 4. Scenarios addressed when analysis coarse milling strategies

Factors	Demand (piece/month)	Takt time (min)	Cutting process parameter	Total production time
Scenario 1	4000-5000	Fixed	Fixed	Variable
Scenario 2	4000-5000	Variable	Variable	Fixed
Scenario 3	2000-4000	Fixed	Fixed	Variable
Scenario 4	2000-4000	Variable	Variable	Fixed

Figure F. Comparison of simulated part cost for different types of special puropse machines.

In summary, a model has been developed for the assessment of performance criteria. Comparison of existing situation and a new policy can then be made. A model for comparison of machine systems solutions has also been developed. The model allows the assesment of productivity performance and costs for different machine systems. Hencem the developed methodology allows the detection of variations in machine system performance and can constiute decision support for selection of types of machines and the machining stratgy. To analyse the systems parameters, a demonstrator has been created in the form of a frame work where STELLA system dynamics software is applied.

Machinability of Work Materials

In this task, Chalmers har first established a platform for determining material data by means of orthoganl maching experiments (2D case) and inverse modelling. Figure G illustrates the concept. For a number of materials, there is good agreement between predictions and experimental data when doing independent maching studies, see e.g. Figure H. The material data has then be used in 3D FE-modelling of the cutting process when studying and assessing the maching on component-like test pieces. With this approach, the machining of combined matwrials has been evaluted virtually and and compared with experiments.

Figure H. Concept for development of material data from orthogonal machining tests and inverse modelling.

Figure I. FE-results (Deform) with material model for aluminium using methodology according to Figure I. Comparison of predictions and experimental data.

A number of validation studies addressing the machining of Al/cast iron components, and hard/soft steel parts have demostrated the applicability of the developed approaches. Wear mechanisms have in this way been assessed and improved machining strategies to counteract the thermal load when machining combined materials like e.g. Al/cast iron have been proposed. The work concept has been further applied in implementation machining studies on real products like the Al/cast iron engine blocks mimicked experimentally in machining experiment via component-like test peices.Further developmet has been directed to the establishment of a modelling platform for prediction of tool wear. The concept has been tested and shown to give relative good agreement between predicted and experimental data in machining experiments involving pearlitic steel as work material. In support for the development of Si-alloyed CGI, machining studies done on component-liek test peices of different variants of such work marterial (with Si-level up to 4.5 wt%) , have shown that tool wear is less than that obtained when machining the reference, the more

abrasive pearlitic CGI. Hence, the expected better machinability of Si-alloyed CGI compared to that of pearlitic CGI is confirmed and further optimisation of machining of Si-alloyed CGI could be depicted through additional machining tests.

The approach to study issues realted to batch-to-batch variations of work material has been to combine laboratory studies and production follow up studies. One important conclusion, shown for the machining of austenitic stainless steel at supplier companies, is tha specifications for incoming material within standard is not a guarantee for similar machinability. The material parameters connected with the austenitic stainless steelas work materila include delivery state (cold drawn, annealed, etc), microstructure (grain size and inclusions content (sulphides, oxides, etc). The delivery state (cold-drawn or soft annealed) was shown to have most effect at higher feed rates and to impact on tool holder stability at high overhang, see Figure J. Differences in chip breaking for machining of cold-drawn and soft-annealed was also shown to be a possible production problem.

Figure J. Deflection at 40 mm overhang. Comparison between tool holder in hardmetal and tool steel.

The role of delivery condition hence is hence of mixed nature; higher feed means that dimensional tolerances could be jeopordized at large overhang och slim structures, while higher feed within limits of surface finish and vibration, means better chip breaking. The effect of inclusion content was also addressed and it was further demonstrated (in line with literature and suppliers specifications) how enough content of soft inclusions (sulphides, encapsulated oxides) improve machinability. Connected to studies shown on stainless steel turning, production follow up by Ages/Värnamo Industry and Bufab Lann are included.

Publications and Internationalisation

The project has resulted in 13 technical papers, whereof 8 already have been published in journals or in edited conference proceedings. The project has resulted in two PhD exams (Malakizadi, Cedergren), one licentiate degree (Ghasemi) and severak master theses. International co-operation has been developed and technology seminars, in which general project results are communicated, have been started.

Contribution to Overall and Specific Programme Goals

The project ”Sustainable Manufactur of Future Engine Components” is set in the context of the overall and specific programme goals to contribute to the competitiveness of the manufacturers of road vehicles and other co-operating industrial actors. The partners have contributed with their specific expertise towards imporved excellence and techncial and scientific results have been connected to development of virtual and physical demonstrators, while securing good scientific publication. The project has demonstrated a new material (Si-alloyed CGI) as alternative material for future engine components. The project has also led to new generic knowledge about machinability of work materials involving an initial technology platform for simulation of metal cutting in 3D, with particular emphasis on combined materials parts, while improved knowledge in the supplier chain regarding material variation effects in machining. Specific steps towards improved assessment of machining strategies have been taken as well, involving the development and application of system dynamics and modelling for analysing machining strategies on both system and process levels.

1. Bakgrund

Utveckling och användning av högpresterande motor- och drivlinekomponter är centralt för konkurrensförmågan hos vägfordon. Nyckelmaterial för avancerade motorkomponenter (motorblock, cylinderhuvud, etc.) innefattar högpresenterande gjutjärn av olika slag och lättmetaller som aluminium. För bilmotorer kombineras t ex motorblock i gjutaluminium med cylinderfoder i gjutjärn. För tunga dieselmotorer bygger nuvarande och kommande lösningar på avancerade gjutjärn. Lagstiftning och krav på lägre emissioner och effektivare motorer innebär att materialens förmåga att klara högre tryck och temperaturer också ökar. Nedskalning av motorer med bibehållna prestanda bidrar till detta scenario. Från ett tillverkningstekniskt perspektiv finns det minst tre viktiga aspekter enligt följande:

1) När det gäller gjutning är det viktigt att klarlägga hur robusta processfönster och legeringsutveckling kan utnyttjas för att skapa gjutna produkter närmare färdig form (near-net-shape eller net-shape) med optimering av mekaniska och termiska egenskaper genom kontroll av grafitmorfologi genom t ex ympningen och ny legeringsteknik med t ex högre Si-halt.

2) När det gäller maskinbearbetning är det väsentligt att förstå hur bearbetningsstrategier m.h.t. till fördefinierade prestandakrav skall väljas för att optimera linjekoncept, nyckeloperationer, implementera nya bearbetningssätt samt rätt utnyttja maskinsystem.

3) För bearbetningsprocesserna är det slutligen centralt att kunna förutsäga bearbetbarheten hos både dagens och morgondagens material, vilket innefattar i) tillgång till produktionsnära metodik för produktionsutveckling och uppföljning av batchvis variation samt ii) mer utvecklade metoder för att klarlägga arbetsmaterials bearbetbarhet genom kontrollerade laborationsprov och modellering. Av särskild vikt är att bättre förstå hur kombinerade material kan bearbetas på bästa sätt.

2. Syfte, frågeställningar och metod

Innehåll

I detta projekt har ovannämnda perspektiv adresserats genom tre olika delaktiviteter. I arbetspaketet ”Gjutning” (WP1) har arbetet fokuserats på nästa potentiella generation av högpresterande kompaktgrafitjärn baserat på förhöjd Si-legering. Syftet är att skapa ett robust processfönster för gjutning av denna typ av material. Arbetspaketet har haft två delar: styrning och mikrostrukturkontroll samt kartläggning av materialegenskaper.

Arbetspaketet ”Bearbetning” (WP2) har innefattat delarna WP 2.1 ”Bearbetningsstrategier” samt WP 2.2. ”Arbetsmaterialens Bearbetbarhet”. Ett syfte är att skapa ett enhetligt koncept för prestandaanalys av maskinsystem och formulering av bearbetningsstrategier för t ex kunna utvärdera olika linjekoncept. Eftersom detta i princip är ett problem kopplat till variationer i material, process, etc., är ett andra syfte att också

ha en utvecklad generisk strategi för känna materials skärbarhet utgående från olika behovsnivåer: att ha tillgång till metodik för att bedöma materials skärbarhet från primärt materialspecifikationer/certifikat; att snabbt kunna utvärdera materials skärbarhet vid behov; att genom laborationstest och modellering ha grundläggande materialdata och metodik för att bedöma bearbetning av kombinerade material och nya material/kombinationer av material. Eftersom bearbetningen slutligen alltid skapar en funktionsyta ingår karakterisering av och koppling till slutlig ytintegritet hos arbetsmaterialet.

Resultaten från arbetspaketen WP1-WP2 har använts i arbetspaketet ”Demonstration” (WP3). I praktiken har detta gjorts genom att arbetet inom WP3 har integrerats med WP1 och WP2 så att dessa övergått i demonstration halvvägs in i projektet och syftet har varit att respektive industripart enskilt eller i vissa fall gemensamt därmed skall kunna värdera potentialen när det gäller framtida implementering. Följande demonstratorer har ingått:

- Gjuten och bearbetat komponentliknade detalj i lösningshärdat kompaktgrafitjärn
- Provgjutningar i industriell miljö
- Virtuell demonstrator i form av metod/simuleringsverktyg utvärderad mot tänkta linjekoncept
- Bearbetningsdemonstratorer avseende kombinerade material i motorkomponenter och kombinationen härdat/icke-härdat stål
- Valda objekt där utvärdering av materialvariationens inverkan på bearbetbarheten och generell produktionsuppföljning är centralt hos underleverantörer

Genom dessa demonstratorer förväntas projektet leda till både direkt industriell nytta och långsiktigt nya enhetliga koncept som stödjer framtida implementering av nya produkter, nya material och nya tillverkningsstrategier. Projektet förväntas också kunna leda till nya metoder och verktyg för att hantera produktionsnära frågeställningar och kunskapsstöd för eventuell framtida implementering av lösningshärdat kompaktgrafitjärn och nya lösningar för kombinerade material.

Organisation och genomförande

Projektet har bedrivits i de tre arbetspaketen Gjutning (WP1), Bearbetning (WP2) och Demonstration (WP3). Varje arbetspaket har haft en ansvarig delprojektledare enligt följande:

WP1: Anders Jarfors, Tekniska högskolan, Jönköping
WP2: Lars Nyborg, Chalmers
WP3: Andreas Archenti, KTH

Till varje WP har en projektgrupp varit knuten, dock har WP2 delats upp i två projektgrupper, en för WP 2.1 Bearbetningsstrategier och en för WP 2.2. Arbetsmaterialen bearbetbarhet. Övergripande för hela projektet har även funnits en styrgrupp med representation för partnerna i projektet (se deltagarförteckning sist). Förutom seniora

forskare vid högskola/institut och företag har projektet engagerat ett antal doktorander enligt följande:

WP1/WP3: 1/3 manår/år doktorand vid Tekniska högskolan, Jönköping
WP2/WP3: 1 doktorand vid KTH med fokus på bearbetningsstrategier
1/2 doktorand vid Chalmers med fokus på material/modellering
1/2 doktorand vid Chalmers med fokus på skärbarhet

Dessa doktorander har bedrivit forskarstudier med stöd från projektet. Parterna i projektet och deras deltagande framgår av Tabell 1 nedan.

Tabell 1 Parterna och deras deltagande i olika arbetspaket

Part	WP1	WP2	WP3
Scania CV	X	X	X
Volvo	X	X	X
Volvo Cars		X	X
Sandvik Coromant		X	X
SKF		X	X
Bufab Lann		X	X
Värnamo Industri/Ages		X	X
Chalmers MCR		X	X
KTH DMMS		X	X
JTH	X		X
Swerea SWECAST	X		X
Sintercast (ny part efter projektstart)	X		X

Projektet har haft ett projektavtal. Chalmers har varit sammanhållande för projektet och projektledare har varit Lars Nyborg, MCR c/o Inst. För material- och tillverkningsteknik. Industrikoordinator har varit Anders Berglund, Scania CV AB.

Samverkan och synergier med andra projekt

Projektet ”Uthållig tillverkning av framtida motorkomponenter” har samverkat nära med andra projekt. Särskilt viktigt har kopplingen varit till ”Realistisk verifiering” där ett doktorandprojekt inom teknisk mekanik vid Chalmers under ledning av Professor Ragnar Larsson utvecklat mikrostrukturkopplad FE-modellering av skärprocessen för gjutjärn. Särskilt har samverkan gällt framtagning av materialmodeller för FE-modellering. Vidare har internationell samverkan etablerats med University of Tours, University of Salento samt McMaster University när det gäller bearbetning av sammansatta material och modellering av bearbetning.

3. Mål

Projektmålen kopplar till de identifierande utmaningarna inom gjutning, bearbetningsstragier samt arbetsmaterialens bearbetbarhet.

När det gäller gjutning har därmed målet varit att ha visat potentialen med lösningshärdat kompaktgrafitjärn som möjligt material för motorkomponenter. Detta mål har adresserats via två aktiviteter, att ha visat hur robust mikrostrukturkontroll kan åstadkommas och hur mekaniska egenskaper kan uppnås och förenas med god dimensionskontroll.

När det gäller bearbetningsstrategier har målet varit att ha ett enhetligt koncept för utvärdering av bearbetningsstrategier utgående från förutbestämda kriterier. Utgångspunkten har här varit en holistisk syn för integration av kritiska processer och komponenter. I detta har ingått att analysera hur variationsproblematik kan hanteras i produktion.

När det gäller arbetsmaterialen bearbetbarhet har målet varit att klarlägga hur materialvariation m.h.t. till två olika förutsättningar kan hanteras. I den ena fallet har variationsproblematiken gällt bearbetningen av så kombinerade material, dvs fräsning av ett motorblock i aluminium med gjutjärnsfoder eller svarvning av detalj med både härdat och icke-härdat material. I det andra fallet har inverkan av batchvis materialvariation på bearbetningen varit fokus. I arbetet med dessa materialrelaterade frågeställningar har målet varit att etablera generisk kunskap och metodik som kan utgöra bas för vidare utveckling av industrianpassade metoder. En del har varit att etablera en metodik där laboratorietester och 2D FE-modellering kombineras för validering av materialmodeller och bearbetningsförsök med fysiska prototyper sedan kombineras med 3D FE-modellering för processtudier och optimering. En del har varit att etablera kunskap kring hur materialcertifikat skall bättre värderas och variationer hos ingående arbetsmaterial skall hanteras för att upprätthålla robust bearbetning. I samtliga fall har som ovan angetts målet också varit att visa på möjliga effekter genom olika demonstratorer (fysiska eller virtuella).

4. Resultat och måluppfyllelse

Nedan redovisas och illustreras resultaten från respektive delområde inom projektet och slutligen sammanfattas deras bidrag till projektmålen och FFI:s programmål på övergripande och delprogramnivå.

6.1. Gjutning

Specifik bakgrund

Högre hållfasthet hos gjutjärn skapar förutsättningar för förbättrade produktlösningar när de gäller motorer för tunga fordon. Bättre mekaniska egenskaper fås normalt genom att matrisens egenskaper hos gjutjärnet optimeras och kombineras med en lämplig grafitmorfologi. En intressant kompromiss som undersökts har varit kompaktgrafitjärn där grafitens mera rundande form innebär bättre mekaniska egenskaper jämfört med gråjärn. Vanligen är då matrisen nära helperlitisk för att uppnå så god hårdhet och styrka som möjligt. Den högre hållfastheten och ändrade grafitmorfologin innebär att skärbarheten blir

sämre än för vanligt gråjärn. Ett intressant alternative som redan tillämpas på segjärn är att öka styrkan genom lösningshärdning av ferriten i matrisen istället och undvika perlit helt. Detta görs då genom legering med kisel med upp till 4%. Fördelen blir att skärbarheten kan förbättras och samtidigt som matrisen sannolikt kan sättas mer lika över en gjuten detalj: Framställning av kompaktgrafitjärn (CGI) kräver för kisellegerat liksom för normalt CGI ett relativt snävt intervall när det gäller både materialsammansättning och svalning för att rätt grafitmorfologi skall erhållas. Kärnbildningen av grafiten är här central. Vidare styr legeringshalterna i vilken omfattning materialet bildar perlit vid svalningen. Det är därför viktigt att bättre förstå hur mikrostrukturkontrollen kan upprätthållas för kisellegerat kompaktgrafit. Vidare har det varit viktigt att förstå mer vilka egenskaper som kan innehållas beroende på kiselhalt och nodularitet.

Mikrostrukturkontroll hos kisellegerat kompaktgrafitjärn
I denna del av arbetspaket har därför studierna inriktats på att frikoppla styrningen av grafitens kärnbildning från närvaron av legeringselement och spårämnen. Arbetet har först innefattat en litteraturstudie (detaljer från denna finns att hämta i en teknisk rapport). Sammanfattningsvis gav den litteraturstudie följande slutsatser:

- Mg i små halter är som tidigare känt centralt för att skapa kompaktgrafit och dess nivå måste kontrolleras väl
- Kärnbildare liksom svalningshastighet och spårämnen (S, O, etc.) är centrala och samverkar med Mg
- Spårämnesnivåer (t ex S-halt) bör kopplas till Mg liksom andra ämnen som deltar i reaktionerna
- Kompaktgrafiten bildas i sekvens

Baserat på litteraturstudien har materialdesignen satts och specifika gjutförsök har utförts enligt följande:

- Gjutning med smältbehandling enligt Sintercastmetoden vid Swerea SWECAST
- Gjutning med Volvometoden hos AB Volvo

I respektive fall tillverkades plattor respektive komponentlika provkroppar (provkropp tidigare utvecklad inom FFI-projektet Optima 2). Hos Swerea SWCAST var smältan ca 500 kg och tre plattgeometrier och fyra komponentlika provkroppar tillverkades från varje smältaför varje variant. Hos Volvo var smältan 3500 kg och två plattgeometrier och sex komponentlika provkroppar tillverkades för varje variant. Figuren nedan visar upplägget för tillverkningen av plattorna.

Figur 2. Upplägg för tillverkning av platta prover med olika tjocklek i kisellegerat gjutjärn.

Vid gjutningar var målbilden tre olika kiselnivåer på 3.7, 4.0 och 4.5% för de tre varianterna, men med anpassade kolhalter för att bibehålla kolekvivalenten. Som framgår av Figur 2 för givet referensprov (tjocklek på platta och position i provet) erhålls för kisellegerat CGI en helt ferritisk matris jämfört med den ferrit-perlitiska för vanligt CGI.

(a) **(b)**

Figur 3. Mikrostruktur hos vanligt CGI (a) och kisellegerat ferritisk CGI.

Tabellerna 2 och 3 nedan sammanfattar data från gjutförsöken hos Swerea SWECAST och Volvo.

Tabell 2. Sammanfattning av gjutförsök med kisellegerat CGI vid Swerea SWECAST

	Thickness (mm)	Nodularity (%)	Nodule count (nodule/mm²)	Pearl (%
Low-Si (3.7 wt.%)	7	38	185	<10
	15	18	71	<10
	30	9	46	<5
	50	5	42	<3
	75	7	61	<1
Medium-Si (4.0 wt.%)	7	46	231	<5
	15	15	83	<5
	30	7	46	<5
	50	5	41	<1
	75	6	60	<1
High-Si (4.5 wt.%)	7	39	222	<1
	15	16	90	<1
	30	14	80	<1
	50	6	55	<1
	75	8	58	<1

Tabell 3. Sammanfattning av gjutförsök med kisellegerat CGI hos Volvo

	Thickness (mm)	Nodularity (%)	Nodule count (nodule/mm²)	Pearlite (%)
Medium-Si (4.0 wt.%)	7	55	205	<5
	15	19	48	<3
	30	7	12	<3
	50	7	17	<1
	75	9	20	<1
High-Si (4.5 wt.%)	7	62	201	<1
	15	30	67	<1
	30	12	24	<1
	50	15	40	<1
	75	11	26	<1

Som framgår av tabellerna fås för hög nodularitet vid minsta gjutbara platttjockleken, dvs CGI-strukturen skapas inte pga. för snabb svalning. Robustheten i att åstadkomma ett helt ferritiskt material stärks om kiselhalten är tillräckligt hög. Vidare kan man konstatera att gjutningarna vid Volvo ger genomgående högre nodularitet än gjutningarna vid Swerea SWECAST. Orsakerna till detta har hänförts till olika förfaranden.

Kontroll av mekaniska egenskaper hos kisellegerat kompaktgrafitjärn

Nästa steg i analysen var att utreda förutsättningarna för kontroll av mekaniska egenskaper hos kisellegerat kompaktgrafitjärn. Detta gjordes I två steg. Först genomfördes en litteraturstudie där teoretiska grunder analyserades. Utgångspunkten var här också att klarlägga vilken kiselhalt som slutligen kan vara lämplig då lösningshärdningen också innebär en risk för minskad duktilitet om kiselhalten blir för hög. Effekt av övriga legeringsämnen studerades därmed även teoretiskt. I korthet gäller att

lösningshärdningseffekten styrs av skillnaden i atomstorlek i förhållande till den för järn och skillnaden i skjuvmodul som induceras genom inlösningen av en t ex kisel i järnmatrisen och att beroendet följer som känt ett konc.$^{1/2}$-förhållande. Dock visar litteraturen att effekten av kisel är mer komplicerad och inte nödvändigtvis lätt förklarad med klassisk mekanism för lösningshärdning.

De mekaniska egenskaperna för de olika varianterna tillverkade vid Swerea SWECAST och Volvo utvärderades. I detta ingick att kartlägga inverkan på E-modul, sträckgräns, brottgräns samt duktilitet (brottförlängning). Data finns för provstavar från alla gjutbara platttjocklekar för de två gjutförsöken. För att kort illustrera resultaten visas valda mekaniska egenskaper nedan i Figur 4 och Figur 5. Med ökad kiselhalt fås högre brottgräns (och sträckgräns) som väntat, men brottförlängningen sjunker också. För minsta platttjockleken med högst nodularitet erhålls också högst brottgräns förenat med störst brottförlängning. Vid den minsta platttjockleken kan dock materialet inte betecknas som kompaktgrafitjärn pga. den höga nodulariteten. Om man jämför data för kisellegerat med perlitiskt kompaktgrafitjärn (se Figur 6), kan man se att ferritiskt kompaktgrafitjärn generella uppvisar högre sträck- och brottgräns för båda kiselhalterna (4-4.5%), medan duktiliteten blir lägre, speciellt för tjockare plattor och den högre kiselhalten. Generellt visar dock resultaten att kisellegerat kompaktgrafitjärn kan framställas med goda egenskaper, speciellt om man väljer att ha tillräcklig men inte för hög kiselhalt.

Figur 4. Brottgräns och brottförlängning för kisellegerat kompaktgrafitjärn tillverkat vid Swerea SWECAST.

Figur 5. Brottgräns och brottförlängning för kisellegerat kompaktgrafitjärn tillverkat hos Volvo.

Figur 6. Jämförelse av mekaniska egenskaper för kisellegerade kompaktgrafitjärn med politiskt CGI för motsvarande plattgeometrier (svalningshastighet mm). 100% motsvarar data för politiskt kompaktgrafitjärn.

Matrishårdhet uppmättes för olika kiselhalter och denna visade på drygt 20% ökning vid förändring av kiselhalten från 3.7 till 4.5%. Vidare kartlades termisk ledningsförmåga och denna visade ingen signifikant koppling till kiselhalten.

Tillverkningstekniska perspektiv
Ur tillverkningsteknisk synpunkt är det viktigt att ha klart för sig förutsättningar för net-shape, minimering av distortion samt eventuell variation av egenskaper i en komponent. En litteraturstudie och preliminärt arbete kring en initial demonstrator för prediktering av mekaniska egenskaper och distortion har genomförts. Litteraturstudien visade inte på tidigare studier kring near-net shape, distortion och simulering av egenskaper. Inledande studier och koncept gjordes därmed med Design Expert mjukvara för framtida vidare implementering av framtagna korrelationer i MagmaSoft. En korrelation mellan brottgräns och parametrarna kiselhalt, nodularitet och perlithalt har tagits fram. Diagnostiska analyser visar på rimligt god korrelation mellan verkliga data och modellerade data.

6.2. Bearbetningsstrategier

Konceptutveckling och metodik
Inom detta arbetspaket har en ny metodik för prestandaanalys tagits fram för värdering av bearbetningsstrategier. Metodiken har tillämpats på tillverkning av motorblock hos Scania som studieexempel. Metodiken bygger på tillämpning av systemdynamikmodellering kombinerat med ett simuleringsbaserat angreppssätt. Metodiken hanterar hur maskinsystemparametrar för bearbetningsprocessen interagerar, hur dessa interaktioner

driver prestanda och hur nya målvärden påverkar maskin- och processparametrar. Mer specifikt ligger nyttan i att kunna förbättra prestanda kring bearbetningsstrategier.

Arbetet har inriktats på fallstudie när det gäller tillverkning av motorblock hos Scania. Maskinsystemet som adresserats illustreras principiellt i Figur 7.

Figur 7. Close-loop maskinsystem.

Bearbetningsstrategin som tillämpas utgör en plan för maskinsystemets tillstånd för att generera en serie av operationer för att bearbeta detaljen med utgångspunkt från ett antal prestandakriterier för systemet. Maskinsystemparametarnas koppling till KPI illustreras i Figur 8.

Figur 8. Maskinsystemparametrar och KPI:s.

Det finns flera metoder för att analysera bearbetningsstrategier och utvärdera prestanda i en tillverkningslina. Här har en metodik baserat på modellering och simulering utgående från systemdynamik använts. Detta är en metodik som kan användas för att designa effektiv policy för hantering av komplexa system.

Tillverkningen av motorblock innefattar en komplex kedja av operationer. I det aktuella fallet har studierna utförts för att jämföra en existerande transferlina med en alternativ flexibel tillverkningslina. Jämförelse kan göras antingen på system- eller processnivå. Valet avgörs av tillämpningen. Vid en systemnivåanalys tillämpas ett holistiskt angreppssätt där alla operationer placeras inuti en box enligt Figur 9 nedan och där detaljer för respektive bearbetningsstation inte beaktas. Analysen utgår därmed från indata för arbetsstycket och externa kontrollfaktorer. Vad som sker i de olika delstegen inuti boxen ingår alltså inte i analysen.

Figur 9. Systemnivåanalys för värdering av bearbetningsstrategier.

Vid en processnivåanalys beaktas varje station i kedjan individuellt för att slutligen kunna bedöma utdata för detaljen när den lämnar tillverkningskedjan. Figur 10 illustrerar detta angreppssätt.

Figur 10. Processnivåanalys – exempel på indata och utdata, aktiviteter och kontrollfaktorer.

För att välja ut vilka kritiska operationer som varit fokus i arbetet har metodik enligt Figur 11 tillämpats och baserat på denna har specifik jämförelse mellan en transferlina och en flexibel lina gjorts.

Figur 11. Metodik för att välja kritiska operationer för processnivåanalys.

Nästa steg har innefattat att sätta upp en generell modell och en modell för specifik process/operation. Två fallstudier har därmed adresserats:

- Modell för prestandautvärdering för varje bearbetningsoperation
- Modell för jämförelse – metodik för jämförelse och val av maskinsystem och linjekoncept innefattande dels en jämförelse mellan transferlina och flexibel lina och dels en modell för liknande maskinsystemlösning men olika design

För att sätta modellerna har en policyanalys utvecklats och tillämpats. En generisk modell har satts genom att utveckla en konceptuell karta för att sedan utveckla en interaktionsanalys när det gäller maskinsystemparametrar och kritiska prestandakriterier på både aggregerad nivå och detaljnivå.

För fallstudien som adresserats inom arbetspaketet har orderhastighet (behov) utgjort källan till variation i tillverkningen. Figur 12 illustrerar hur en konceptuell karta för maskinsystemparametrarna kan konstrueras.

Figur 12. Illustration av konceptuell karta för maskinsystemparametrars koppling.

Varje kausal länk i Figur 12 har getts ett positivt eller negativt värde vilket anger om korrelationen är proportionell eller omvänt proportionell. Prestandamått som har adresserats i analysen har innefattat produktivitet, kostnad och kvalitet.

Resultat - fallstudier

Den ena fallstudien som adresserats var enligt ovan en modell för prestandaanalys när det gäller val av maskinsystem som svarar upp mot framtida behov inom tillverkning av motorblock med hänsyn taget till valda prestandamått. *Det första scenariot* för fallstudien innebär att existerande maskinbearbetning adresseras och en modell har etablerats för detta. Figur 13 illustrerar prestandaanalysen när det gäller hur orderläge och tillverkning förhåller sig till varandra vid minskade behov. De skarpa droppen i kurvan är egentligen inte resultat från modellering med systemdynamik utan ett resultat av växling av komponent i tillverkningen, som också har kunnat modelleras. Man kan se att risken finns att produktionshastigheten (då underhåll, etc. görs) momentant når låga nivåer med hög detaljkostnad som följd.

Det andra scenariot för fallstudien innebär att en modell har etablerats för policyanalys där det gäller att sätta gränser för t ex bearbetningsdata (skärhastighet, matning, etc.) i förhållande till orderhastighet. Denna analys har gjorts för situationen med ökad orderhastighet och för situationen med minskad. För den första situationen har analyserna visat att behovet kan mötas inom visst intervall för produktionshastigheten. För den andra

situationen har analyserna visat att skärdata kan justeras för att anpassas till orderläget och därmed skapa fördelar när det gäller t ex verktygskostnader pga. minskad förslitning. Figur 14 illustrerar jämförelsen när det gäller detaljkostnad mellan aktuell situation och föreslagen policy.

Figur 13. Tillverkningshastighet (genomflöde) och orderhastighet i förhållande till varandra modellerat för existerande bearbetning.

(ii) Decreasing demand

Figur 14. Kostnad per detalj för aktuellt förhållande jämfört med föreslagen policy.

En andra fallstudie som adresserats gällde analys av olika ordersituationer där grovbearbetning studerats. Olika situationer som belysts framgår av Tabell 4 nedan. Scenario 1 utgör referens och scenario 2 svarar för rekommenderad policy från simuleringen och scenarierna 3 och 4 är tänkta som situationer där flexibiliteten och hållbarheten för maskinbearbetningen har analyserats. I ett fall gällde analyserna att se skillnader mellan valet av transfermaskin eller fleroperationsmaskin. I ett fall gällde analyserna att se skillnader mellan olika typer av transfermaskiner.

Tabell 4. Scenario som adresserats i simuleringen

Factors	Demand (piece/month)	Takt time (min)	Cutting process parameter	Total production time
Scenario 1	4000-5000	Fixed	Fixed	Variable
Scenario 2	4000-5000	Variable	Variable	Fixed
Scenario 3	2000-4000	Fixed	Fixed	Variable
Scenario 4	2000-4000	Variable	Variable	Fixed

Fallstudien visar att simuleringsmetodiken som tillämpats kan ge relevant information som stöd för beslut. För att illustrera erhållna resultat visas nedan jämförelsen mellan de olika typerna av transfermaskiner (special purpose machines, SPM) i Figur 15. Från figuren framgår att lösningen med varianten SPM2 ger högre detaljkostnad för samtliga scenarier.

Figur 15. Jämförelse av simulerad detaljkostnad för två olika typer av transfermaskiner.

En samlad analys av de olika scenarierna har gett följande slutsatser för fleroperationsmaskinlösningen:

- Övertidskostnaden blir noll; då behovet ökar minskar takttiden och tillverkning helgarbete undvikes
- Verktygskostnaden reduceras; processen kan taktas ned då behovet är lägre och som följd kan matning och skärhastighet minskas, varvid verktygsslitage minskar och verktygskostnaden i slutändan minskar

Motsvarande gäller dock inte för transfermaskinlösningen eftersom skärdata måste justeras för verktygen parallellt. Gränserna för skärdata för att tillförsäkra kvalitetskrav är därmed snävare och fördelarna som kan åstadkommas med fleroperationsmaskinlösningen kan inte åstadkommas.

Sammanfattande slutsatser - bearbetningsstrategier
En modell för utvärdering av kriterier för prestanda har utvecklats. Jämförelse mellan aktuell situation och ny policy kan göras. Det framtagna policyscenariot indikerar en maximal besparing på 6% per detalj.

En modell för jämförelse av maskinlösningar har tagits fram. Modellen visar att transfermaskinlösningar ger bättre produktivitetsprestanda till lägre kostnad än fleroperationsmaskinlösningar samt också är mer robust när det gäller ändrad bearbetningsstrategi. Fleroperationsmaskiner ger dock större flexibilitet med hänsyn taget till källor till variation och bedöms vara mindre känslig när det gäller ändrad bearbetningsstrategi. Ytterligare exempel på slutsatser finns redovisade i en separat teknisk rapport (T. Fetene Adane, A. Archenti, : M. Nicolescu, KTH, 2015).

Sammanfattningsvis medger den framtagna metodiken detektion av variationer när det gäller tillverkningssystemets beteende och kan utgöra beslutsstöd vid val av maskinsystem och bearbetningsstrategi. För att analysera och systemparametrar har en demonstrator tagits fram i form av ett ramverk där STELLA system dynamics software tillämpas.

6.3. Arbetsmaterialens bearbetbarhet

Detta arbetspaket har adresserat arbetsmaterialens bearbetbarhet utgående från fyra olika perspektiv:

1. Skärbarhet för kombinerade material med fokus på kombinationen aluminium/gjutjärn
2. Skärbarhet för kombinerade material med fokus på kombinationen härdat/icke-härdat stål
3. Skärbarhet för kisellegerat kompaktgrafitjärn
4. Skärbarhet kopplat till batchvis materialvariation med fokus på rostfria stål

Aktivitet 1 adresserar intressen och behov hos Volvo Cars när det gäller motorblock kombinerat med intresse från Sandvik Coromant. Aktivitet 2 adresserar intressen och behov hos SKF och intresse från Sandvik Coromant. Aktivitet 3 adresserar intresse hos Scania och Volvo och kopplar till WP1 gjutning. Aktivitet 4 adresserar intressen och behov i leverantörsledet hos Bufab Lann och AGES (Värnamo Industri).

Kombinerade material
När det gäller bearbetning av kombinerade material, som Volvo Cars aluminiummotorer med ingjutna cylinderfoder, är inte bearbetningsförsök med studier av verktygsslitage, etc., praktiskt möjligt på testkroppar från sådana produkter då tillräckligt långa bearbetningsprov inte kan göras. Sandvik har därför utvecklat och patenterat en komponentlik provkropp för att möjliggöra dessa studier där bearbetningsförsök har sedan genomförts vid Chalmers för att studera inverkan av val verktygsbana och verktyg samt korrelation mellan experiment och FE-simulering av skärprocessen.

För att kunna göra detta har Chalmers först etablerat en plattform för simulering av skärprocesser genom framtagning av materialdata via ortogonala bearbetningsförsök (2D) och inverssimulering. Figur 15 nedan illustrerar konceptet. Figur 16 visar utformningen av provkroppen för försöken. Detta angreppssätt har gett att det idag finns etablerade materialmodeller för Al-gjutlegeringen, gjutjärn (CGI), perlitisk grundmassa i stål och/eller gjutjärn samt också för Ni-material (som jämförelse). Dessa materialdata har sedan kunnat användas för prediktering av skärprocesser med FE-program (Deform 2D/3D). Delvis har detta arbete skett i samverkan med projektet ”Realistisk verifiering”. Nedan ges exempel på resultat. Figur 17 visar verifiering av konceptet när det gäller framtagning av parametrar för materialmodell (JC-modell) för FE-beräkningar när det gäller kolstål. Figur 18 visar resultat för bearbetning av gjutaluminiumet och Figur 19 visar resultat för gjutjärnet (GCI) som båda ingår i den komponentlika provkroppen. Med dessa verktyg och metoder har även bearbetningsprocesserna för kombinerade material kunnat studeras virtuellt och jämförts med experiment med den komponentlika provkroppen, etc.

Figur 15. Koncept för framtagning av materialdata genom ortogonal bearbetningsförsök och inversmodellering.

Figur 16. Utformning av provkropp för ortogonala skärförsök

för bestämning av materialdata genom inversmodellering.

Figur 17. Verifiering av konceptet enligt Fig. 15 för stål (JC-modell). Kurvorna avser experimentella data och punkter är simuleringar.

	CT (µm)	CL (µm)	Fc (N)	Ft (N)
FEM(360 m/min)	210	216	168	80
Exp.(360 m/min)	214	241	152	108
FEM(480 m/min)	197	205	164	72
Exp.(480 m/min)	186	208	145	95

Figur 18. FE-resultat (Deform) med materialmodell framtagen för aluminium genom metodiken enligt Figur 2. Jämförelse mellan experimentella och predikterade data. I sammanhanget bör noteras att de simuleringar som gjorts vid Chalmers ger en betydligt bättre representation av spånkarakteristik än flertalet tidigare studier som redovisats i litteraturen inom området.

Figur 19. FE-resultat (Deform) med materialmodell framtagen för gjutjärn (GCI) genom metodiken enligt Figur 2. Jämförelse mellan experimentella och predikterade data. I sammanhanget bör noteras att de simuleringar som gjorts vid Chalmers ger en betydligt bättre representation av spånkarakteristik än flertalet tidigare studier som redovisats i litteraturen inom området.

Olika valideringsstudier har genomförts där materialmodeller för kombinerade arbetsmaterial (Aluminium och gjutjärn) har implementerats i Deform 3D.

En sådan studie har gällt fräsning med CBN-verktyg. Resultaten från simuleringar har sedan använts tillsammans med studier av verktygsmaterialen slitage för att förklara vilka förslitningsmekanismer som har uppträtt i en verklig produktion (fallstudie förmedlad av Sandvik Coromant). Figur 20 jämför temperaturfördelningen som predikterats för CBN-verktyget då det är i ingrepp aluminiumet respektive gjutjärnet. Arbetet visar hur termiska spänningar orsakar verktygspåverkan och hur simuleringen kan användas för att optimera process och verktygsval.

Figur 20. Temperaturfördelning på CBN-verktyg vid ingrepp i gjutjärn (vänster) respektive aluminium (höger) vid givna skärdata.

En annan tillämpningsstudie har gällt processoptimeringsstudierna på komponentlika provkroppar bestående av Al/gjutjärn (se Figur 21). Modelleringen med FEM som etablerats har här använts för att kunna prediktera skärförloppet för olika skärdata och metodiken har visat sig kunna användas för att bedöma olika bearbetningsstrategier vid en

fräsoperation. Ett resultat av sådant optimeringsarbete illustreras i Figur 22. Som resultat av arbetet har implementeringsstudier på verkliga produkter (motorblock) genomförts tillsammans med Volvo Cars. Vidare har genom samarbete mellan Chalmers och KTH en ny metodik utvecklats där övergången mellan material geometriskt varieras och skärförloppen studeras dynamiskt. Provkroppen som utvecklats är föremål för eventuell patentering och redovisas därför inte i denna rapport.

Figur 21. Fräsförsök med komponentlik provkropp (Al/gjutjärnsfoder) i laborationsmiljö.

Figur 22. Illustration av optimeringsstudie för fräsoperation på komponentlik provkropp enligt Fig. 21. Optimala förhållanden med depth of cut 0.35 mm, cutting speed 200 m/min och feed 0.25 mm (övre hörnet i nedre högra diagrammet). Illustration av fasförslitningen på verktyget (hårdmetall) för 250 m/min+0.15 mm +0.50 mm (nedre högra hörnet i övre vänstra diagrammet).

I övrigt när det gäller bearbetning av sammansatta material har arbetet fokuserats på den andra tillämpningen, dvs en produkt bestående av både härdat och icke-härdat stål. Provmaterial för detta har tagits fram genom induktionshärdning av rotationssymmetriska kroppar och bearbetningsförsök har sedan genomförts på dessa med olika skärverktyg och skärdata. Figur 23 illustrerar ythärdningen som erhålls genom induktionshärdningen för ett av materialen (två stål med två olika kolhalter ingick i studien). Bearbetningsförsöken har sedan genomförts genom att skärverktyget växelvis har passerat genom härdat och icke-

härdat material. Inför försöken gjordes även noggrann karakterisering av arbetsmaterialen. Bearbetningsförsöken utvärderades dels m a p verktygsförslitning, spånbildning och skärkrafter mm samt dessutom m a p den erhållna ytans kvalitet. Figur 24 illustrerar det senare där ytans topografi bestämts genom interferensmikroskopi för härdat och mjukt tillstånd. Bearbetningen ger jämnast yta i det första fallet generellt, vilket kan förklaras av ökad så kallad löseggsbildning i det senare fallet. Från studierna framgår även att valet av skärverktyg kan ha avgörande betydelse för utfallet m.h.t. till val av skärdata mm. I detta innefattas t ex uppkomsten av olika dominerande förslitningsmekanismer.

Figur 23. Ythärdning av provkropp inför bearbetningsförsök där skärverktyg växelvis går i ingrepp i härdat och icke-härdat material. Figuren sammanfattar hårdhetsvärden uppmätta genom mikrohårdhetsprovning.

Figur 24. Ytjämnhetsmätning på bearbetad yta av stål i härdat och mjukt tillstånd.

En vidare fördjupning till undersökningarna enligt ovan har varit att etablera en plattform för prediktering av verktygsslittaget. Figur 25 illustrerar konceptet som etablerats. Konceptet har testats när det gäller modellering av fasförslitning i 3D vid bearbetning av perlitiskt stål och metodiken har visat sig ge relativt bra överensstämmelse mellan predikterade och experimentella data.

Figur 25. Koncept för prediktering av verkstygsförslitning. Metodiken är generiskt och kan tillämpas för olika dominerande förslitningsmekanismer där kopplingen sker via lämplig matematisk beskrivning av den aktuella förslitningsmekanismen (abrasiv, kemisk, etc.).

Bearbetning av kisellegerat kompaktgrafitjärn

Bearbetning av kisellegerat CGI Detta arbete har genomförts som stöd till WP1 gjutning för att jämföra skärbarheten hos kisellegerat kompaktgrafitjärn med traditionellt perlitiskt kompaktgrafitjärn. Försöken genomfördes genom fräsförsök på komponentlika provkroppar (modell från tidigare Optimaprojekt) som tillverkats inom WP1. Komponenterna för bearbetningsstudierna visas i Figur 26.

Figur 26. Komponentlika provkroppar framtagna i kisellegerat kompaktgrafitjärn för skärbarhetsstudier.

Materialkarakterisering har gjorts som komplement och jämförelse till den som gjorts inom WP1. Figur 27 illustrerar resultat från detta arbete, där matrisens helferritiska karaktär visas tillsammans med den karakteristiska formen hos grafiten i ett kompaktgrafitjärn. Efter genomförda skärbarhetsstudier har materialmodeller för FE-simulering tagits fram genom inversmodellering och ortogonala skärförsök på restkroppar från de skärbarhetsstudierna.

Figur 27. Mikrostruktur hos en variant av kisellegerat kompaktgrafitjärn.

Resultat från förslitningstester där fräsning genomförts på komponentlika provkroppar visas i Figur 28. Fasförslitningen för hårdmetallskär vid fräsning i kisellegerat kompaktgrafitjärn med tre olika kiselhalter jämförs med resultaten med perlitiskt kompaktgrafitjärn. Man kan notera att samtliga kisellegerade material ger lägre verktygsförslitning än den perlitiska varianten. Faktumet at den lägst kiselhalten ger något högre förslitning än de två övriga har inte kunnat förklaras. Den högre förslitningen vid bearbetning av det perlitiska kompaktgrafitjärnet kan förklaras av materialets abrasiva påverkan på skärverktyget pga. dess innehåll av cementit, vilket också kan ses tydligt i form av en mer aggressiv förslitning enligt Figur 29. Bilderna visar ungefär samma

fasförslitning men denna nås efter 10 passeringar för perlitiska materialen, medan 36 passeringar behövs för det ferritiska materialet.

Figur 28. Fasförslitning (V_B) vid fräsning kisellegerade kompaktgrafitjärn (Si37, Si40 och Si45) och perlitiskt kompaktgrafitjärn (CCGI). Beteckningarna Si37, etc., avser kiselhalterna, dvs 3.7, 4.0 samt 4.5% kisel. Bearbetning enligt viss strategi över provkroppen.

Figur 29. Förslitning på skärverktyg vid bearbetning av perlitiskt kompaktgrafitjärn (vänster) och kisellegerat ferritiskt kompaktgrafitjärn (höger).

Bland övriga observationer kan nämnas mindre vibrationer vid bearbetning av kisellegerat material samt kortare spånor. Vidare erhålls även lägre skärkrafter även om dessa ökar med ökande kiselhalt (dock fortfarande lägre än för det perlitiska kompaktgrafitjärnet). Ökad kiselhalt innebär starkare och hårdare material och därmed större skärkrafter när det gäller gjutjärn. Ett sådant samband är dock inte generellt för alla typer av arbetsmaterial.

Sammanfattningsvis kan man dra slutsatsen att kisellegerat kompaktgrafitjärn generellt uppvisar bättre skärbarhet än perlitiskt kompaktgrafitjärn utgående från flera kriterier enligt ovan. Studier med olika bearbetningsstrategier när det gäller fräsningen av provkroppen visar vidare på potentialen att optimera skärdata för olika scenarier kopplat

till t ex minimering av verktygskostnad (verktygsförslitning) eller minimering av cykeltiden för att maximera utflödet eller behovet av parallella maskiner.

Batchvis materialvariation

Det sista tillämpningsfallet när det gäller arbetsmaterialens bearbetbarhet har gällt frågeställningar kring materialvariationer I produktion. I detta fall har tillämpningen gällt svarvning av rostfritt stångmaterial (automatsvarvning). Angreppssättet har här varit att kombinera fördjupade studier i laboratorium med produktionsuppföljningsstudier. I laboratoriestudier har kontrollerade skärförsök kombinerats med materialkarakterisering. Specifika frågeställningar har möjlig inverkan av materialspecifikation och leveranstillstånd.

En viktig slutsats från litteraturstudier och omfattande utredningsarbete är att materialcertifikat som anger att inkommande material ligger helt inom standard inte är en garanti för att det har liknande egenskaper när det gäller potentiell skärbarhet. Detta kan relativt enkelt förklaras av den stora variation av bakomliggande processvägar (r ex reduktionsgrad vid extrusion, kalldraget tillstånd och/eller släckglödgat, skärförbättrande tillsatser i material eller inte, förekomst av så kallad deltaferrit, förekomst av deformationsmartensit, etc.) som kan förekomma. Generellt kan man sammanfatta materialinverkan på skärbarhet för rostfritt stål (som inte kan värmebehandlas) enligt tre faktorer:

- Leveranstillstånd
- Mikrostruktur (t ex kornstorlek)
- Inneslutningar (t ex mangansulfider, oxidpartiklar, etc.)

Utredningsarbetet har också visat på ett antal faktorer som kan beaktas vid val av materialleverans enligt följande:

- Ritningar specificerar sällan stålets leveranstillstånd
- Variation i råmaterialpriser är större än skillnaden mellan leveranstillstånd
- Stänger dras oftast från en utgångsdiameter till mindre diametrar för att öka utbudet av stångdiametrar
- Vanligen skalsvarvas stängerna och detta ger hårdhetgradienter tvärs som kan vara olika beroende på leveranstillstånd

Frågeställningen är då att kunna bearbeta olika leveranstillstånd och om detta påverkar robustheten och/eller introducerar produktionsavvikelser. Bearbetningen för två olika leveranstillstånd, mjukglödgat och kalldraget, studerades därför närmare när det gäller skärkrafter och spånbrytning. Tabell 6 visar materialdata för dessa varianter. Två olika skärverktyg användes, CVD-belagd hårdmetall och PVD-belagd, där den förra har tjockare beläggning. Eggradien för den förra var 37-40 μm och för den senare 22-24 μm.

Tabell 6. Varianter av rostfritt stål som använts som arbetsmaterial i studierna

Leverans-tillstånd	Diameter [mm]	Sträckgräns [MPa]	Brottgräns [MPa]	Brottförlängning [%]	Hårdhet [HB]
Mjukglödgad	32	293	554	50	159
Kalldragen	25	482	667	41	195

Ett antal observationer kan sammanfattas enligt följande:

- Mjukglödgat ger tjockare spåna och därmed har mer arbete krävts (högre skärkrafter) trots lägre styrka
- Beläggningen har ingen betydelse för skärkrafterna (jfr Fig. 30 nedan)
- Viss effekt av leveranstillståndet kan ses för större matning (jfr Fig. 31)
- Används olika överhäng påverkas dessa olika mycket av materialvariationer, Hårdmetallhållare är därmed effektiva på att minska utböjning och att föredra (jfr. Fig. 32)
- Skillnader i spånbrytting vid bearbetning i mjukglödgat och kalldraget kan innebära produktionsproblem (jfr. Fig. 33)

Figur 30. Skärkrafter för olika matningshastigheter (skärhastighet 150 m/min) vid svarvning i mjukglödgat austenitiskt rostfritt stål med PVD- respektive CVD-belagda skär.

Figur 31. Skärkrafter för olika matningshastigheter (skärhastighet 150 m/min) vid svarvning i mjukglödgat respektive kalldraget austenitiskt rostfritt stål.

Figur 32. Utböjning vid 40 mm:s överhäng. Jämförelse mellan verktygshållare i hårdmetall och verktygsstål.

Den sista slutsatsen kan kopplas till situationen att man kör in en svarvoperation på en bra "batch" och sedan får in en "dålig" batch i produktion. Som framgår av Figur 31 nedan ändras spånbrytningen till det bättre vid högre matning och vid något olika skärdata för mjukglödgat jämfört för kalldraget.

Figur 33. Spånkarakteristik för olika skärdata vid bearbetning av mjukgloddgat och kalldraget rostfritt stål av typ 304L.

En konsekvens av dålig spånbrytning är att detta kan ge spånklämning som leder till urflisning av verktyget. Om man då sammanfattar inverkan av leveranstillstånd kan man se viss effekt när det gäller höga matningar, vilket skulle kunna påverka dimensionstoleranserna svid stora överhäng eller tunnväggiga detaljer. Dock, för att säkerställa spånbrytning krävs inom gränser för ytfinhet och vibrationer höga matningar, vilket innebär att åtgärderna är varandras motsatser och en kompromiss kan behöva göras.

Om man sammanfattar studierna och utredningen kring faktorerna leveranstillstånd, mikrostruktur och inneslutningar kan följande fastslås.

När det gäller leverenstillståndets inverkan är slutsatsen att det alltid är bättre att köra mot fasförslitning och undvika svårkontrollerad gropförslitning. Variation pga. leveranstillstånd hanteras då bäst med konstanta skärhastigheter medan matningsändringar kan tillåtas.

När det gäller mikrostrukturen inverkan på skärprocessen visar studierna att detta gäller kornstorleken i arbetsmaterialet. Mindre korn ger starkare material och viss positive effekt av ökad kornstorlek har indikerats i litteraturen.

När det gäller inneslutningar finns det mjuka typ mangansulfid och hårda typ aluminiumoxid. Man tillsätter t ex kalcium vid ståltillverkningen för att påverka aluminiumoxiderna och därmed modifieras deras sammansättning och göra dem mjukare. Det är inte bara typen utan också deras fördelning I materialet. Inneslutningsbilden har stor betydelse för verktygsslitaget. Figur 32 illustrerar rostfritt austenitiskt stål med högre (vänster) och lägre (höger) förekomst av mangansulfidslagg, vilket också innebär högre verktygsslitage i det senare fallet.

Figur 34. Rostfritt austenitiskt stål med högre (vänster) och lägre (höger) förekomst av mangansulfidslagger. Det senare materialet ger större verktygsslitage vid bearbetningen.

Kopplat till redovisade studier ingår produktionsuppföljningar gjorda hos Ages samt Bufab Lann.

6.4. Bidrag till programmål och projektmål

Från FFI:s mål och färdplaner framgår följande:

¨FFI syftar till att stärka svensk fordonsindustris konkurrenskraft och ge fordonsindustrin och vägtransportsystemet en hållbar inriktning genom problemdriven, samfinansierad forskning och innovation. Målsättningen är att bidra till att säkra utvecklingen av ett nationellt innovationssystem i världsklass inom fordonsområdet.

¨Delprogrammet Hållbar produktion syftar i första hand till att möjliggöra tillverkning av nya fordonslösningar, samt till en stärkt global konkurrenskraft som medger minimerad miljöpåverkan och ökad fordonssäkerhet¨.

Projektet “Hållbar produktion av framtida motorkomponenter” är satt i detta sammanhang för att direkt bidra till fordonsindustrins konkurrenskraft och i övrigt också stärka andra industriella aktörer som samverkar med fordonsindustrin. I projektet har deltagit samtliga fordonsföretag (Scania CV, Volvo och Volvo Cars), vidare har en viktigt teknikleverantör (Sandvik Coromant) gjort avgörande insatser i projektet till gagn för fordonsföretagens produktionsutveckling. Slutligen har också andra komponenttillverkare som SKF och komponenttillverkande företag inom underleverantörsleden (Ages, Bufab Lann) deltagit i projektet. Vidare har tre samverkande högskolor (Chalmers, KTH, JTH) deltagit

tillsammans med ett forskningsinsititut (Swerea SWECAST). Varje part har bidragit med sin specialistkompetens. Detta har bidragit ytterligare till att säkra utvecklingen av ett nationellt innovationssystem i världsklass. Dels har resultat kunnat kopplas till utveckling av konkreta demonstratorer (fysiska och virtuella) vilket innebär att projektet har utvecklat förmågan att driva forskning och utveckling i TRL-trappan. Vidare har detta kunnat kombineras med god vetenskaplig publicering, examensarbeten samt inte minst leverans av forskarutbildade. Projektet har bidragit till två doktorsexamina, en licentiatexamen samt kommer att bidra till ytterligare en forskarexamina. Projektet har vidare inneburit att internationell samverkan har stärkts genom sampubliceringar och nya samarbeten.

Om man ser mer specifikt till målen för delprogrammet "Hållbar produktion" har projektet kan projektet specifikt kopplas till utvecklingen av förmågan att kunna producera nya produkter, komponenter och material. I detta ingår delutmaningarna "Robust och effektiv produktion och beredning" samt "Ökande krav på volym- och variantflexibilitet".

Projektets koppling till ökad förmåga enligt ovan motiveras t ex av att projektet lett till att ett nytt material (kisellegerat kompaktgrafitjärn) har kunnat demonstreras som alternativ för framtida motorkomponenter. Materialet har högre prestanda när det gäller hållfasthet än dagens gjutjärn och samtidigt bättre bearbetbarhet än tidigare alternativ när det gäller kompaktgrafitjärn.

Vidare har projektet lett till ny generisk kunskap när det gäller arbetsmaterialens bearbetbarhet och där särskilt när det gäller sammansatta material. Experimentella resultat har här förenats med en initial teknikplattform för processimulering av skärprocessen i 3D. Eftersom mixade material är en viktigt väg att skapa lättvikt innebär detta att projektet förbereder för fortsatt utveckling och forskning inom området för framtida behov. Inom detta område har också projektet inneburit ökande kunskap inom underleverantörsledet när det gäller att bedöma materialvariationer och därmed förutsättningar för mindre och medelstora företag att driva hållbar produktion.

Om sedan ser till förutsättningar att hantera krav på volym- och variantflexibilitet har specifika bidrag här generats när det gäller utveckling och hantering av bearbetningsstrategier, dels genom utveckling av specifika test (komponentlika provkroppar) och ovannämnda processmodellering, men framförallt genom den simuleringsmetodik som introducerats med stöd av systemdynamik för att analysera bearbetningsstrategier på både system- och processnivå. Det är centralt här liksom i övrigt ovan är att forskningen har kopplats till demonstratorer och fallstudier stegvis under projektet och därmed också inneburit att resultatens effekter har kunnat tillgodogöras på ett bra sätt inom industrin.

Som ett led i strävan att sprida kunskap har även tekniseminarier redan etablerats via parternas nätverk.

Specifikt när det gäller projektmålen som definierats framgår av ovan att resultaten som uppnåtts väl svarar mot det som definierats:

- Ett nytt material har demonstrerats med potential för framtida motorkomponenter
- En ny metodik för analys och bedömning av bearbetningsstrategier har etablerats
- Ny kunskap när det gäller arbetsmaterialens bearbetbarhet har etablerats med speciell tillämpning för kombinerade material som är central för framtida design av avancerade motorlösningar där experimentell teknik för utvärdering av bearbetbarhet har kombinerats med en initial teknikplattform för processmodellering i 3D.

Resultaten enligt ovan har slutligen visats genom validering av resultat på demonstratorer.

5. Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Resultat från projektet kommer att föras vidare inom fortbildning. Resultat från projektet kommer också att spridas via riktade seminarier hos parterna.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Projektet har lagt en grund för vidareutveckling av nytt material. Projektet har lagt en grund för ny simuleringsteknik (3D FE-simulering av skärprocesser). Projektet har lagt en grund för utvärdering av bearbetningsstrategier på system- och processnivå.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Ytterligare insatser krävs för att lyfta TRL-nivån
Introduceras på marknaden	x	Ytterligare arbete krävs här för att lyfta TRL-nivån
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		

Resultat och kunskap från projektet kommer att tas tillvara i den mån det kan realiseras i EU-projekt. Resultat från projektet kommer att tas tillvara i den nya samverkan som etableras inom Sverige inom produktionsområdet med Fraunhoferinstituten, vilket därmed blir ett naturligt sätt att adressera höga TRL-nivåer. Vidare har redan resultat från projektet börjat spridas via tekniskseminarier. Detta gäller särskilt till mindre och medelstora företag genom samverkan mellan MCR Chalmers och Skärteknikcentrum Sverige AB. Specifikt kommer också tekniskseminarier att genomföras kopplat till industriparternas behov.

7.2 Publikationer

Vetenskapliga artiklar

Malakizadi, S. Cedergren, K. Babu Surreddi, L. Nyborg. "A methodology to evaluate the machinability of Alloy 718 by means of FE simulation." *Advanced Manufacturing Engineering and Technologies NEWTECH 2013 Stockholm, Sweden 27-30 October*

2013 : 95.
Malakizadi, I. Sadik, L. Nyborg. "Wear mechanism of CBN inserts during machining of bimetal aluminum-grey cast iron engine block."*Procedia CIRP* 8 (2013): 188-193.
Malakizadi, S. Cedergren, I. Sadik, L. Nyborg. "Inverse identification of flow stress in metal cutting process using Response Surface Methodology." *Simulation Modelling Practice and Theory* 60 (2016): 40-53.
Malakizadi, K. Hosseinkhani, Keyvan, E. Mariano, E. Ng., A. Del Prete, L.Nyborg, Influence of Friction Models on FE Simulation Results of Orthogonal Cutting Process, To be submitted to International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Malakizadi, I. Sadik, L. Nyborg, Machining of Bi-metal Aluminium-Grey Cast Iron Engine Block: Process Optimisation by means of FEM, To be submitted to International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
Malakizadi, H. Gruber, I. Sadik, L. Nyborg, An FEM-based approach for tool wear estimation in machining, To be submitted to Wear.
R. Ghasemi, L. Elmquist, H. Svensson, M. König, A.E.W. Jarfors, Mechanical Properties of Solid Solution Strengthened CGI, 10th International Symposium on the Science and Processing of Cast Iron – SPCI10. Mar del Plata , Argentina. (CD proceedings)
R. Ghasemi, L. Elmquist, H. Svensson, M. König, A.E.W. Jarfors, Mechanical Properties of Solid Solution Strengthened CGI, International Journal of Cast Metals Research, 2015 (in press).
T. Matsushita, E. Ghassemali, A. G. Saro, L. Elmquist, A. E. W. Jarfors, On Thermal Expansion and Density of CGI and SGI Cast Irons, Metals 2015, 5, 1000-1019; doi:10.3390/met5021000
S. Cedergren, L. Nyborg, G. Sjöberg, Influence of the Delivery State on Machinability of Austenitic Stainless Steels when Using CVD and PVD Coated Tools, Swedish Production Symposium 2014, 16-18 Sep, 2014, Gothenburg.
T. F. Adane, M.F. Bianchi, A. Archenti, M. Nicolescu, Performance evaluation of machining strategy for engine-block manufacturing. Journal of Machine Engineering. Vol. 15 No. 4, 2015
T. F. Adane, M.F. Bianchi, A. Archenti, M. Nicolescu, A decision support system for machine tool selection with consideration of the interaction of attributes, in the review process of 'European Journal of Industrial Engineering''
T. F. Adane, M. Nicolescu, Framework (generic model) for the performance evaluation of machining strategy, Completed and ready to be submitted to journal.

Avhandlingar

R. Ghasemi, Tribological and Mechanical Behaviour of Lamellar and Compacted Graphite Irons in Engine Applications, Licentiate thesis, February 2015, Jönköping University
Amir Malakizadi, Optimisation of Machining Operations by means of Finite Element Method and Tailored Experiments, PhD thesis, 2015, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden
Stefan Cedergren, Influence of Material Variations on Machinability – Machining Difficult-to-Machine Alloys, PhD thesis, 2015, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

Tekniska rapporter

T. Fetene-Adane, A. Archenti, M. Nicolescu, "Machining Strategy for Future Engine Block Manufacturing – Case Study at Scania", Department of Industrial Production, KTH, 2015

R. Ghasemi, A. Jarfors, FFI Report Work Package I&III, Jönköping University, 2015.

Examensarbeten

Mohammad Rezazadeh Bina, Development of 2D-Machining Test for Assessing Material Properties in Metal Cutting Simulation, 2012, Master thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Saeed Azimi, Experimental study of orthogonal metal cutting on CGI having different micro-constituents, 2012, Master thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.

Sujithguru Loganthan, Performance Study of Ceramic Tools in Machining Hypo-Eutectoid Steels with Intermittent Soft and Induction Hardened Regions, 2014, Master thesis, Chalmers

Carsten Behring, Investigation on Machinability of Solution Hardened Compacted Graphite Iron, 2015, Master thesis, Chalmers University of Technology

6. Slutsatser och fortsatt forskning

Projektet har lett till att ett nytt material (kisellegerat kompaktgrafitjärn) har kunnat demonstreras som alternativ för framtida motorkomponter. Materialet har högre prestanda när det gäller hållfasthet än dagens gjutjärn och samtidigt bättre bearbetbarhet än tidigare alternativ när det gäller kompaktgrafitjärn. För att vidare implementera möjligheterna till användning av materialet är det viktigt att förstå hur materialet kan gjutas brett till olika provgeometrier med goda egenskaper som följd och dimensionskontroll. Ansatser till förutsättningar för nära färdig form finns, men mer kunskap krävs här. Vidare kan materialoptimering kombineras med utvärdering av fler materialegenskaper som t ex utmattningshållfasthet och tribologiska egenskaper av betydelse för olika tillämpningar.

. Genom projektet har en ny simuleringsmetodik introducerats som bygger på systemdynamik för att analysera bearbetningsstrategier på både system- och processnivå. Forskningen har kopplats till fallstudier stegvis under projektet och därmed också inneburit att resultatens effekter har kunnat tillgodogöras på ett bra sätt inom industrin. Modellen visar på potential för analys av komplexa val när det gäller bearbetningstrategier. Samtliga källor till variation har dock ännu inte kunnat adresseras. I nästa steg är det viktigt att modellen kan hantera variation på grund av arbetsmaterial och design, som kan uppstå vid introduktion av nya komponenter. Vidare är skillnaden i skärbarhet som kan finnas då två olika material hanteras i ett och samma produktionssystem. Ett ramverk för val av maskinlösning för tillverkning av en specifik detalj har utvecklats för tillverkning av en speficik detalj, men en metodik saknas fortfarande för att bedöma en hel produktionslinje där det behövs en metod för att kunna välja utformning av en produktionslinje eller för att kunna föreslå strategin/policyn för den ny produktionslinan.

Vidare har projektet lett till ny generisk kunskap när det gäller arbetsmaterialens bearbetbarhet och där särskilt när det gäller sammansatta material. Experimentella resultat har här förenats med en initiell teknikplattform för processimulering av skärprocessen i 3D. Inom detta område har också projektet inneburit ökand kunskap inom underleverantörsledet när det gäller att bedöma materialvariationer och därmed förutsättningar för mindre och medelstora företag att driva hållbar produktion. Metodiken när det gäller att sätta materialmodeller för godtyckligt material via kontrollerade skärförsök i laboratorium är generell och kan tillämpas kommande projekt för nya material när deras bearbetning utvecklas. Metodiken med att tillämpa 3D simulering medger prediktering av verkliga bearbetningssituationer. Dock behövs ytterligare forskning för at finjustera modelleringen och gör aden än bättre när det gäller precision och fysikalisk materialkoppling. Processmodellering mha FE-metoder är knappast något som etableras som standardmetod för optimering av skärprocesser. De kan dock utgöra stöd förökad förståelse och ge underlag för alternativa bearbetningsstrategier för en given process. Det är även viktigt att korrelera denna till enklare modeller/beräkningsverktyg (t ex Excelbaserade kalkyler) som kan användas relativt snabbt och robust inom produktionsutveckling. Detta kan då vara metodik som kopplar till införande av digital teknik när det gäller involvering av mätteknik in-line eller hantering av materialdata som kan ha betydelse för bearbetbarheten.

Eftersom mixade material är en viktigt väg att skapa lättvikt innebär detta att projektet förbereder för fortsatt utveckling och forskning inom området för framtida behov när det gäller nya materialkombinatioer och deras bearbetbarhet och/eller helt nya material.

Som ett led i strävan att sprida kunskap har även tekniseminarier redan etablerats via parternas nätverk. Detta kommer att byggas vidare på genom olika fortbildningsinsatser.

7. Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektledare och vetenskapligt ansvarig:

Professor Lars Nyborg Chalmers tekniska högskola MCR, c/o Inst. för material- och tillverkningsteknik e-post: lars.nyborg@chalmers.se

WP1 – Gjutning

Delprojektledare, Anders Jarfors, Tekniska högskolan, Jönköping
Henrik Svensson, Volvo
Pål Schmidt, Volvo
Anders Berglund, Scania CV
John Moré, Scania CV Mathias König, Scania CV
Anders Gotte, Swerea SWECAST
Roger Svenningsson, SWECAST
Tobias Björklind, Sintercast Steve Wallace, Sintercast
Anders Jarfors, Tekniska högskolan, Jönköping
Rohollah Ghasemi, Tekniska högskolan, Jönköping

WP2 – Bearbetning

Delprojektledare: Lars Nyborg, Chalmers (WP2.1)
Andreas Archenti, KTH (WP 2.2)
Anders Berglund, Scania CV
Anders Johansson, Scania CV
Johan Ottosson, Volvo
Rolf Johansson, Scania CV (WP3)
Tobias Svensson, Bufab Lann
Jari Kuivalainen, Värnamo Industri
Jacek Kaminski, SKF
Ibrahim Sadik, Sandvik Coromant
Tigist Fetene Adane, KTH
Amir Malakizadi, Chalmers
Stefan Cedergren, Chalmers

WP3 – Demonstration

Delprojektledare: Andreas Archenti, KTH
Deltagare från WP1 och WP2