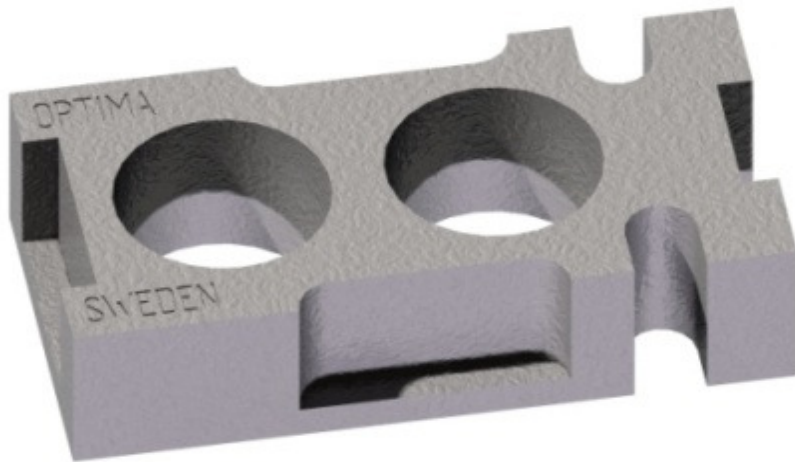




FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

# Slutrapport: Optimerade Materials för Robust Bearbetning – Fas Två Dnr 2009-0997



Författare: Lars Nyborg, Hans-Börje Oskarson, Ingvar Svensson, Stefan Cedergren, Varun Nayar, Anders Berglund

Delprogram: Hållbar Produktionsteknik

## Innehåll

<b>1. Sammanfattning</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Bakgrund</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Syfte</b> .....	<b>3</b>
<b>4. Genomförande</b> .....	<b>4</b>
<b>5. Resultat</b> .....	<b>6</b>
<b>6. Spridning och publicering</b> .....	<b>13</b>
6.1 Kunskaps- och resultatspridning.....	13
6.2 Publikationer .....	13
<b>7. Slutsatser och fortsatt forskning</b> .....	<b>14</b>
<b>8. Deltagande parter och kontaktpersoner</b> .....	<b>15</b>

### 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](http://www.vinnova.se/ffi)

## 1. Sammanfattning

**OPTIMA FAS TVÅ** har syftat till att utveckla förståelse och skapa förutsättningar för en robust bearbetningsprocess genom ny kunskap om samspelet skärande bearbetning - material – materialframtagningsprocess. Kopplingen mellan arbetsmaterial och bearbetningsprocess har projektet speciellt adresserat hur framtidens maskinbearbetning kan optimeras och utvecklas för kompaktgrafitjärn (CGI), höghållfasta legeringar och sammansatta material. Ett uttalat mål har varit att bidra till ökad produktivitet inom maskinbearbetning. Projektet har byggt på tidigare arbete i det föregående projektet Optima inom MERA-programmet. Den ökade produktiveten skapas genom bättre kontroll av materialspecifikationer, optimerad bearbetning och verktygskoncept för bearbetning av CGI, utveckling grundläggande kunskap om materialbeteende och modellering när det gäller bearbetning av sammansatta material samt ökad kunskap om grundläggande förhållanden för interaktionen mellan grundmaterial och skärverktyg. I denna ansats ingår även att ta fram inledande förutsättningar för ett produktionsanpassat korttidsprov för utvärdering av bearbetbarhet samt avslutande kunskapsspridning genom internseminarier och implementering av resultat i utbildningsmaterial. Projektets resultat innefattar:

- En kunskapsplattform för bearbetning avancerade material
- Optimerad gjutning och bearbetning av CGI
- Ökad produktivitet i tillverkningskedjor
- Utbildningsmaterial för kunskapsspridning

Detta har skett genom praktiska försök i produktionsmiljö i samverkan med materialleverantörer och verktygsleverantörer samt modellförsök, analys och modellering/simulering av de grundläggande sambanden med hjälp av doktorander och forskare på högskolor, universitet och forskningsinstitut. Projektet har också generat tre doktorer som anställts inom fordons- och verkstadsindustri, internationell samverkan och ca 20 vetenskapliga publikationer. Eftersom **OPTIMA FAS TVÅ** har omfattat en stor materialbredd – från gjutjärn till höghållfasta legeringar har en stor insats gjorts på att öka kunskapsbredden och den generiska förståelsen för inverkan av materialbeteende vid maskinbearbetning, även om fokus har varit gjutning och bearbetning av kompaktgrafit. Projektet innebär också en fortsatt förstärkning av en kunskaps- och teknikplattform med ett strategiskt nätverk inom avancerad tillverkningsteknik.

## 2. Bakgrund

För fordonsindustrins skärande bearbetning av drivlinekomponenter är materialens bearbetbarhet mycket viktig för produktivitet och konkurrenskraft. Kraven på förbättrade fordon innebär behov av lättare konstruktioner, mindre emissioner och effektivare motorer och drivlinor. Detta innebär produktutveckling med införande av nya produkter och material. Motor- och drivlinetillverkning är en kärna för den svenska fordonsindustrin. I denna tillverkning svarar skärande bearbetning för ett stort förädlingsvärde och det är därför av avgörande betydelse att ha effektiva bearbetningsprocesser.

## 3. Syfte

**OPTIMA FAS TVÅ** har därför syftat till att ge grundläggande förståelse och skapa förutsättningar för en robust bearbetningsprocess genom ny kunskap om samspelet skärande bearbetning - material – materialframtagningsprocess. Genom kunskapen om kopplingen mellan arbetsmaterial och bearbetningsprocess har projektet speciellt adresserat hur framtidens maskinbearbetning kan optimeras och utvecklas för:

- Kompaktgrafitjärn (CGI) (tillämpning)
- Höghållfasta legeringar (generisk del)
- Sammansatta material (tillämpning)

## 4. Genomförande

### Strategi

Projektet har byggt på tidigare arbete i det föregående projektet Optima inom MERA-programmet. Ett uttalat syfte har varit att bidra till ökad produktivitet inom maskinbearbetning. Det industriella långsiktiga målet som satts för detta är 30% för ovannämnda tillämpningar. Den ökade produktiveten skapas genom bättre kontroll av materialspecifikationer, optimerad bearbetning och verktygskoncept för bearbetning av CGI, utveckling grundläggande kunskap om materialbeteende och modellering när det gäller bearbetning av sammansatta material samt ökad kunskap om grundläggande förhållanden för interaktionen mellan grundmaterial och skärverktyg. I denna ansats ingår även att ta fram inledande förutsättningar för ett produktionsanpassat korttidsprov för utvärdering av bearbetbarhet samt avslutande kunskapsspridning genom internseminarier och implementering av resultat i utbildningsmaterial enligt MSU-konceptet (MSU = modern skärteknisk utbildning). Projektets förväntade resultat innefattar:

- En kunskapsplattform för bearbetning avancerade material
- Optimerad gjutning och bearbetning av CGI
- Ökad produktivitet i tillverkningskedjor
- Utbildningsmaterial för kunskapsspridning

Detta har skett genom att öka den nödvändiga kunskapen på två plan:

- Praktiska försök i produktionsmiljö i samverkan med materialleverantörer och verktygsleverantörer och där resultaten omedelbart kan implementeras,
- Modellförsök, analys och modellering/simulering av de grundläggande sambanden med hjälp av doktorander och forskare på högskolor, universitet och forskningsinstitut.

OPTIMA FAS TVÅ har omfattat en stor materialbredd – från gjutjärn till höghållfasta legeringar har en relativt stor insats gjorts på att öka kunskapsbredden och den generiska förståelsen för inverkan av materialbeteende vid maskinbearbetning, även om fokus har varit gjutning och bearbetning av kompaktgratit.

### Organisation och praktiskt genomförande

Chalmers har varit sammanhållande för projektet med projektledaren Lars Nyborg, MCR c/o Inst. för material- och tillverkningsteknik. Industrikoordinator har varit Göran Sjöberg, Volvo Aero, på uppdrag av Volvo och projektkonsortiet. Projektet har bedrivits i de tre arbetspaketen:

Höghållfasta legeringar – generisk del (WP1)

Kompaktgratitjärn (WP2)

Sammansatta material inkl. modellering (WP3) (del från WP1 som brutits ut som separat WP)

Arbetspaketen har letts av delprojektledare enligt följande:

WP1: Göran Sjöberg, AB Volvo

WP2: Hans-Börje Oskarson, MCR-Chalmers

WP3: Lars Nyborg, MCR-Chalmers

Till varje WP har en projektgrupp varit knuten. Övergripande för hela projektet har funnits en ledningsgrupp/styrgrupp med representation för parterna i projektet. Projektet har engagerat ett antal doktorander enligt följande:

WP1: Stefan Cedergren, Chalmers/Volvo/Volvo Aero

WP2: Anders Berglund, KTH, Varun Nayyar (60%), Chalmers, Mathias König, JTH

WP3: Amir Malakizadi (f r o m Nov 2010), (50%), Chalmers

Parterna i projektet och deras deltagande framgår av Tabell 1 nedan.

Part	WP1	WP2	WP3
Volvo	X	X	
Volvo Cars			X
Sandvik Coromant/ Sandvik Tooling		X	X
Sintercast		X	
Novacast		X	
Daros/Federal Mogul		X	
Chalmers MCR	X	X	X
KTH DMMS		X	
JTH		X	
Swerea SWECAST		X	
Swerea KIMAB		X	

En mindre insats från Lunds tekniska högskola var också ursprungligen planerad men denna har utgått och arbetet har istället utförts vid Chalmers efter överenskommelse.

Arbetet i arbetspaketen/delprojekten har i hög grad följt de uppgjorda planerna. WP1 har haft den bredare ansats än WP2 och syftat till att åstadkomma en skärbarhetsutvärdering där både höghållfasta legeringar och drivlinematerial (stål) har beaktats. Bearbetningsstudier av titan har även ingått. Arbetet inom WP1 har primärt utförts av Chalmers och Volvo. Förutom doktorandarbetet (Cedergren) har examensarbeten bedrivits. Därtill har internationell samverkan utvecklats inom snabba deformationer (UC San Diego, prof. K. Vecchio).

När det gäller WP2 har fokus varit ett arbetsmaterial – kompaktgråjärn (CGI). CGI kan komma att ersätta dagens gråjärn i tunga dieselmotorer för att klara ökande temperatur och lastkrav i motorerna som följd av skärpta krav på lägre avgasemissioner. Syftet har här varit att utveckla grunder för optimal skärbarhet för CGI i verkliga komponenter, att etablera en materialmodell för gjutning och en initieell databas för framtida bearbetningssimulering. Ett viktigt medel för arbetet har varit den komponentlika provkropp som framtagits i föregående projekt och de unika provmaterialen i form av 18 varianter av CGI i form av platta provkroppar (fräsförsök) och cylindrar (svarvförsök). I WP2 har Chalmers och KTH svarat för FoU-arbete på bearbetning, medan JTH och Swerea SWECAST ansvarat för FoU-arbete när det gäller gjutning. Swerea KIMAB har svarat för en mindre undersökning av skär som använts i försök vid CGI-bearbetning vid KTH. Sandvik har bidragit med kompetens när det gäller skärbarhetsstudier och optimering av verktygskoncept. Volvo och Scania har båda bidragit med materialframtagning och dessutom med produktionsutvecklingsarbete. Sintercast och Novacast har bidragit med kompetens och insatser vid framtagningen av CGI-material. FoU-arbetet har främst genomförts av doktoranderna vid Chalmers (Varun Nayyar), KTH (Anders Berglund) och JTH (Mattias König) samt en forskare (Henrik Svensson) vid Swerea SWECAST. Som stöd för specifika frågor har också av flera examensarbeten genomförts.

Delprojektet sammansatta material (WP3) inleddes med en förstudie i form av ett examensarbete. Från och med Nov 2011 engagerades en ny doktorand vid Chalmers (A. Malakzadeh) på halvtid inom projektet. Den andra halvan har stötts med andra medel (MCR samt strategiska medel inom styrkeområde Produktion vid Chalmers). Volvo Cars har svarat för provmaterial och produktionsutvecklingsarbete och Sandvik Tooling har bidragit med handledare och expertis (adj. prof. Ibrahim Sadik).

#### Ekonomi och åtaganden i projektet

Projektet har genomförts under perioden 2009-07-01 till 2012-03-31 med en total omslutning på 17,07 Mkr, varav 7,7 Mkr har utgjorts av VINNOVA-bidrag, 9,18 Mkr av industriinsatser och 0,19 Mkr egen finansiering vid högskola/institut. Industriinsatserna har därmed svarat mot mer än 50% av nedlagda kostnader.

### Samverkan och synergier med andra projekt

En viktig koppling har varit till FFI-projektet "Realistic Verification", där grunden läggs till en mikrostrukturkopplad FE-modellering av skärprocessen i kompaktgrafitjärn. Vidare har internationaliseringsprojektet VERA (PTC-MCR-forskarskolan CAPE) gett möjligheter till internationella vistelser för doktorander inom Optima fas två. Doktoranden V. Nayyar har t ex utvecklat samarbete med Universitet i Tours och Safety i Frankrike, samarbetspartners till Sandvik Coromant när det gäller kompaktgrafitbearbetning. När det gäller den generiska delen (WP1) har det arbetet kopplats till material- och processmodellering samt framtagning av materialdata (Ekmanska stiftelsen) med studier av snabba deformationsförlopp (NFFP-projekt) innefattande internationellt samarbete med University of San Diego (professor K. Vecchio). Området material- och processmodellering är också ett aktivt fält inom den strategiska satsningen på produktion vid Chalmers och LTH. För KTH gäller motsvarande kopplingar till deras strategiska satsning inom produktion. När det gäller materialframtagning-gjutning finns kopplingar till CIC (Casting Innovation Centre).

## 5. Resultat

### 5.1 Bidrag till FFI-mål

Optima fas två har samlat en kritisk massa av samverkande företag, högskola och institut. Projektet har haft en internationell uppkoppling (se ovan), producerat doktorer/licentiatier enligt plan och dessutom resultaterat i en omfattande internationell publicering i välrenommerade tidskrifter inom området och presentationer vid ledande konferenser (CIRP, etc). Resultaten har tagits fram i nära samverkan mellan parterna i de olika arbetspaketen/delprojekten och spridits internt inom företagen genom speciellt riktade seminarier. Därtill finns det nytt utbildningsmaterial om gjutning och bearbetning av kompaktgrafitjärn för t ex fortbildning.

Kännetecknande för projektet är kombinationen av grundläggande forskning kring nya och avancerade materials framställning och bearbetning med industriell kunskapsutveckling som gemensamt syftat till att stödja vidareutvecklingen av konkurrenskraftig komponenttillverkning i enlighet med övergripande mål. Sverige intar en ledande position i världen när det gäller avancerad tillverkning och utveckling av motor- och drivlinekomponenter. Oräknat utvecklingen i Kina, motsvarar produktionen i Sverige av motorer och drivlinekomponenter i övrigt för ca. 20% respektive 11% av hela världsproduktionen. Projektet har varit centralt fokuserat kring frågor som rör möjligheterna för implementering av nya starkare gjutna material (t ex kompaktgrafitjärn) i framtida motorkomponenter, där detta innebär att aktuella och kommande emissionskrav kan mötas genom material som tål högre temperaturer och laster än dagens gjutjärn. Problemet är dock den sämre skärbarheten och den mera komplicerade gjutprocessen för t ex kompaktgrafitjärn. Resultaten från projektet förväntas här ha bidragit till ny kunskap som bidrar till effektiv produkt- och produktionsutveckling inom området. Initiativet med en generisk del kring bearbetning och inledning av arbete när det gäller framtidsområdet bearbetning av sammansatta material har också varit centralt för att bredda kunskapsutvecklingen och förbereda nya insatser/projekt där industriella behov kan mötas.

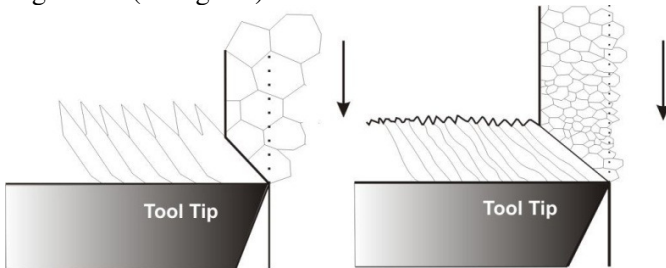
Unikt för projektet har också varit både den breda industriella samverkan inom fordonsindustrin (Volvo inkl Volvo Aero, Scania CV, Volvo Cars) samt uppkopplingen till tre FoU-miljöer (Chalmers MCR, KTH DMMS samt CIC (JTH och Swerea SWECAST)). Dessa tre miljöer har genom projektet fortsatt utvecklat en samverkande FoI-miljö där kompletterande kompetens och expertis samlas. I projektet har också deltagit centrala parter som Sandvik Coromant/Sandvik Tooling när det gäller skärande bearbetning och Sintercast, Novacast och Daros (Federal Mogul) som gemensamt har unik expertis när det gäller framställning av kompaktgrafitjärn.

### 5.2. Sammanfattning av viktiga resultat

#### **WP1: Höghållfasta legeringar – generisk del**

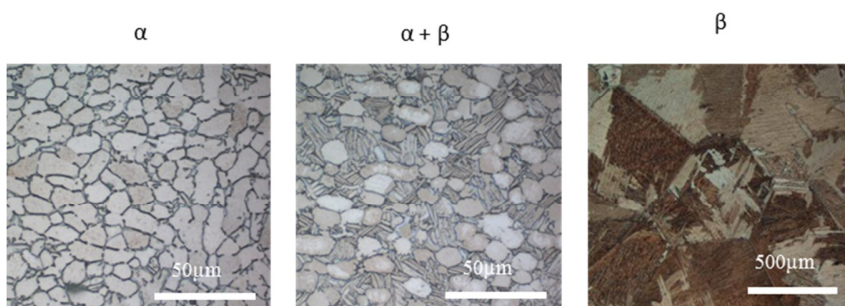
Målet med detta delprojekt är "skärbarhetskriterier för höghållfasta material". Jämfört med arbetet i föregående Optimaprojekt inom MERA-programmet har delprojektet haft ett breddat fokus där kolstål, rostfritt stål samt titan (Ti-6-4) tillförts försöksmatrisen förutom Ni-basmaterial. Utgångspunkten för delprojektet är

arbetsmaterialets mikrostrukturens tydliga roll för fenomen som uppträder vid skärande bearbetning. Den viktigaste observationen var att kornstorleken snarare än materialets hårdhet hade en avgörande effekt på gradbildning och spånegenskaper. Modellen är att "ingreppets storlek" i förhållande till materialstrukturen är avgörande (se Figur 1).



Figur 1. Grundläggande modell för mikrostrukturens (kornstorlekens) inverkan på spånkaraktistik vid skärande bearbetning.

Fenomenet enligt Figur 1 utreddes vidare genom variation av skärdata. En tydlig övergång från kontinuerlig spåna till segmenterad observerades för små kornstorlekar, oavsett härdningstillstånd, medan övergången var otydlig på den redan ojämna deformationen för grovkornigt material. En modell och teoribildning kring fenomenet har utvecklats för en kommande publikation innefattande aspekter av adiabatiska förhållanden, etc. Uppkomst av förslitningsmekanismer som t ex strålförslitning på verktygs materialet har liksom gradbildning också utretts vidare inom delprojektet. När det gäller gradbildning observerades samma beteende hos rostfritt stål som Alloy 718 kopplat till matning och kornstorlekseffekter hos materialen. Vid bearbetning av sätthäringsstål i normaliserat tillstånd, vars mikrostruktur har två beståndsdelar – mjuk ferrit och relativt hård perlit, uppvisades annorlunda effekt av matning på gradbildning. För att komplettera bilden av arbetsmaterialets inverkan undersöktes även bearbetning av Ti (6Al-4V) i tre olika tillstånd (Figur 2).



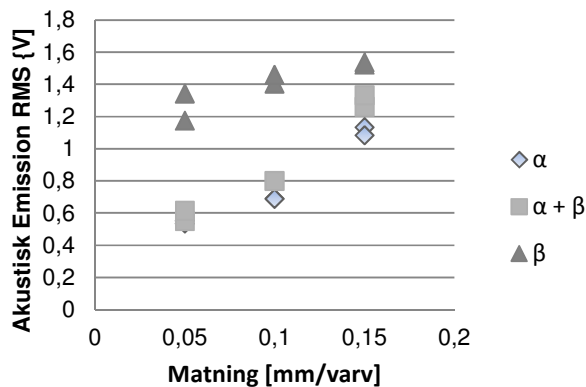
Figur 2. Undersökta mikrostrukturer i Titan 6Al-4V i bearbetningsförsök.

Trots viss skillnad i hårdhet, var det inga nämnvärda skillnader i skärkrafter vid bearbetning av materialen. Den inhomogena deformationen för  $\beta$ -tillståndet gav hög emission oavsett matning. För övriga tillstånd,  $\alpha$  och  $\alpha + \beta$ , korrelerade den ökade periodiska segmenteringen, vid ökad matning, väl med ökad akustisk emission (Figur 3).

Det är tydligt att endast kornstorlek inte räcker för kriterier för gradbildning, utan att även kristallstrukturer samt olika kombinationer av dessa måste ingå i modeller. Där kornstorleken har visats stor inverkan är heller inte mekaniska egenskaper nog för att beskriva inverkan.

Kunskap om mikrostrukturens och skärparametrarnas inverkan i kombination är central för bedömning av skärbarhet av olika material och ger möjlighet att anpassa skärdata i produktion.

Förståelsen av mikrostrukturens inverkan på gradbildningen leder till möjligheter till att styra materialspecifikationer för att minimera grader och på så sätt reducera kostnader för dessa oönskade extraoperationer.

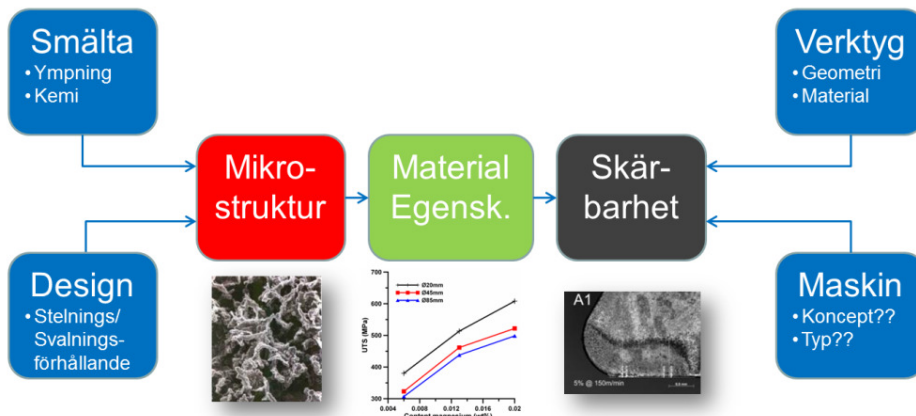


Figur 3. Samband mellan uppmätt akustisk emission RMS och matning vid bearbetning av Ti.

Mikrostrukturens inverkan på spånformen kan även detekteras genom mätning av akustisk emission, även då ringa skillnad i skärkrafter uppmätts. Detta öppnar för att in-line känna av arbetsmaterialets mikrostrukturer och anpassa skärdata för att minimera gradbildning och strålförlitning.

## WP2: Kompaktgrafitjárn (CGI)

Syftet med delprojektet har varit att skapa en kunskapsplattform som är nödvändig för framtida tillverkning av avancerade motorkomponenter som uppfyller kommande prestanda och miljökrav. Det generella målet har varit att öka kunskapen kring hur jämn bearbetbarhet kan erhållas utan att kompromissa med regler för mikrostrukturen för kompaktgrafitjárn (jfr Figur 4).



Figur 4. Samspelet mellan materialtillverkning, egenskaper och skärbarhet.

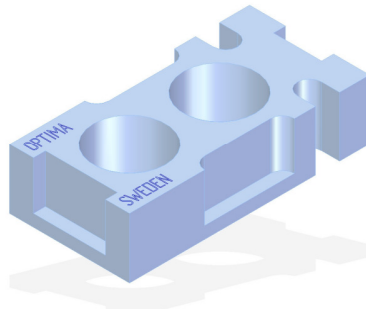
I komponenttillverkning är kritiska operationer viktiga för den totala effektiviteten. Arbetet har därför fokuserat på studier av fräsning och arborning i komponentlik provkropp (Figur 5) för att:

- Undersöka hur verktygsgeometrier och skärdata påverkar fräsning och borning av CGI.
- Bygga en modell för optimering av fräsning/uppborning (invändig svarvning) i CGI. Modellen skall ta hänsyn till mikrostruktur, verktygsgeometri och skärdata.

Olika geometrier såsom cylindrar, ”komponentlika provkroppar” samt en cylinder som använts för ”simulerad fräsning” har sålunda gjutits upp i stort antal. Målet har även varit att kartlägga hur de



eventuella variationerna kan sprida från komponent till komponent, men även hur strukturen kan variera inom en och samma komponent. I Tabell 2a visas t.ex. hur mikrostrukturen varierar mellan fem "identiska" cylindrar, men även hur nodulariteten variera med tjockleken på en och samma cylinder. Tabell 2b visar resultat från utförd dragprovning på tre av de fem analyserade cylindrarna. För bearbetningsstudierna är det då centralt att den komponentlika provkroppen är homogen. Ingående materialanalyser och materialprovningar har visat att så var fallet.



Figur 5. Komponentlik provkropp för experimentell simulering av skärbarhet med relevans för verkliga komponenter i produktion.

Tabell 2. a) Mikrostruktur hos fem CGI cylindrar, b) Resultat från dragprovning av tre cylindrar.

a)

Prov	Nodularitet (%)			Perlit (%)	Fri cementit, karbider (%)
	Ytterkant	Mitten	Innerkant		
C1	9	7	4	90	<1
C2	4	5	4	80	<1
C3	11	12	9	85	<1
C4	5	6	7	80	<1
C5	5	7	5	85	<1
Medel	7	7	6	84	<1

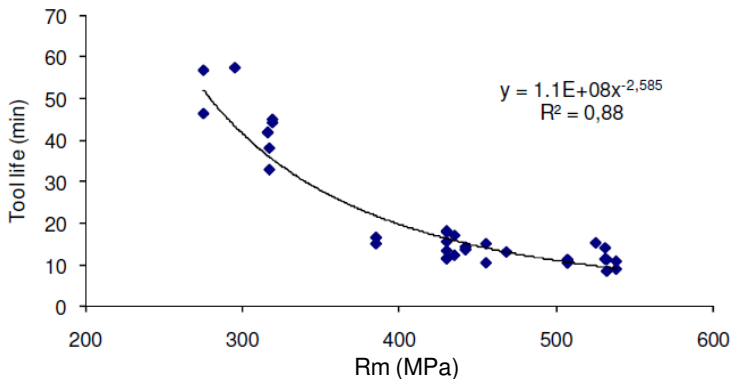
b)

Prov	Rp0,2 [MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]
C1	298	403	1,7
C2	300	404	1,8
C3	317	422	1,7

När det gäller kontinuerlig bearbetning (typ arborning) har studierna visat att verktygsförslitningen för hårdmetall är starkt relaterad till CGI-materialets brottgräns, hårdhet och perlithalt. Skärkraften uppvisar däremot en måttlig ökning med ökad brottgräns. Dragbrottningsgränsen ( $R_m$ ) är beroende av nodularitet, perlithalten och perlithalten i materialet. Vid bearbetning med kontinuerligt ingrepp har därför verktygslivslängden och skärkrafter i relation till perlithalt och nodularitet studerats. Resultaten sammanfattats i en empirisk modell enligt Figur 6. Modellen gäller för nodularitet 3% - 32% och perlithalt 21% - 98%.

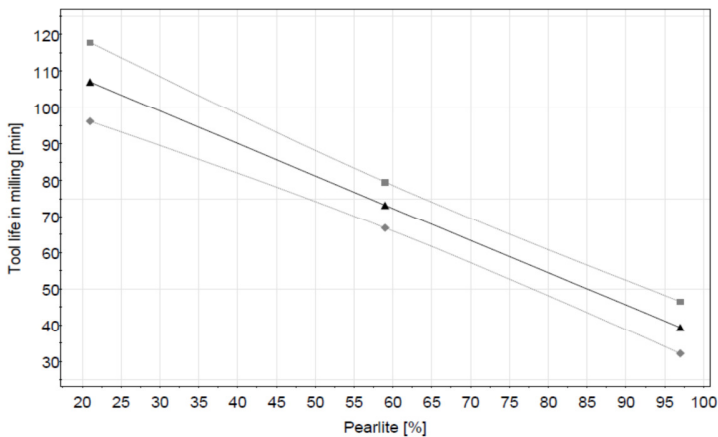
För att vidare förstå förhållandena i skärzonen studerades hur temperaturen i skärzonen påverkas av olika material och skärdataparameterar. Skärtemperaturen registrerades på verktygets släppningssida enligt särskilt utarbetad metod och resultaten visade att denna temperatur kunde korrelerade till skärhastighet men inte till CGI-materialens brottgräns.

Generellt sett visar genomförda studier att lägre skärhastighet och högre matning är att rekommendera för bästa produktivitet vid bearbetning av CGI-material i kontinuerligt skärningrepp. Spånstudier visar att spånformen är gynnsam för samtliga material och oberoende av skärhastigheten. Skärvätskans inflytande på skärkrafterna studerades även och generellt har skärvätska sänkande inverkan på skärkraften oberoende av materialkvalitet för arbetsmaterialet. En särskild studie genomfördes även där speciellt framställda skär med varierande eggradie för två geometrier utvärderades m a p den producerade ytans geometri och verktygsförslitningen. Vikten av eggradien för förslitningen kunde därmed fastställas. På motsvarande sett undersöktes inverkan av spetsgeometrier hos spiralborrar, varvid rangordning och kartläggning av deras funktion kunde göras.



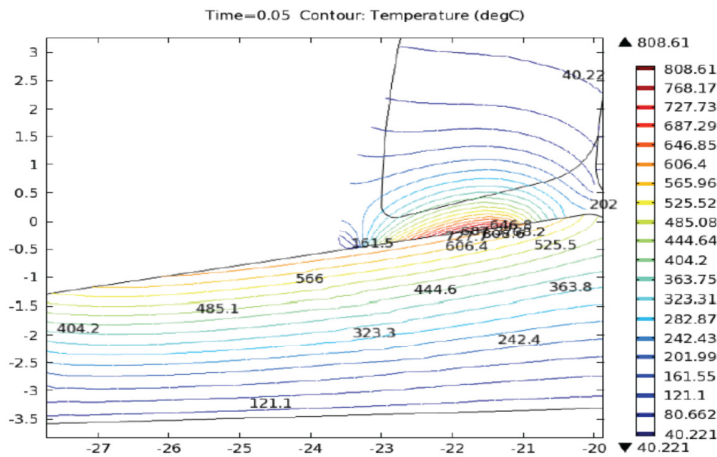
Figur 6. Verktyglivslängdens samband med brottgränsen för de 18 CGI-kvaliteterna inom projektet.

När det gäller intermittent bearbetning (som fräsning) av CGI bekräftades bilden ovan att perlithalten har avgörande betydelse för verktygsförslitningen, se Figur 7. Vidare konstaterades att nodulariteten i intervallet under 20% hade ringa inverkan, medan förekomsten av hårda primärkariber (som styrs av halten karbidbildande ämnen i materialet) har stor betydelse för verktygsförslitningen. Krav på legeringsinnehåll för att undvika oönskad karbidbildning i CGI-materialet kunde därmed fastställas. Slutligen studerades skärparametrarna (matning, skärhastighet) inverkan generellt genom bearbetningsförsök på komponentlik provkropp där vikten av ökad skärhastighet med abrasivt slitage som styrande för ökad verktygsförslitning kunde konstateras samtidigt som kopplingen mellan olika skärdata och förändringar i förslitningsbilden också var tydliga. För att skapa ökad grundläggande förståelse kring förhållandena vid intermittent bearbetning av CGI utvecklades därför också en inledande termomekanisk FE-modell med stöd av data från in-situ temperaturmätningar med värmekamera och tester med så kallade frysta skär (quick stop). Figur 8 illustrerar temperaturfördelning mha FE-modellen.



Figur 7. Inverkan av CGI-materialets perlithalt på verktyglivslängden vid fräsning.

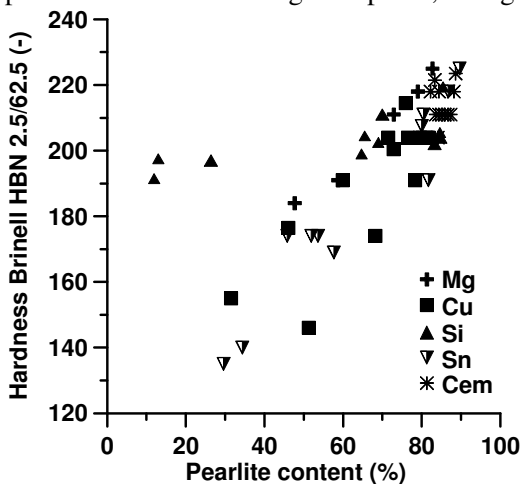
Uppkomsten av olika CGI-strukturer beror på materialsammansättning och gjutförhållanden. Variationen av struktur inom en komponent liksom batchvis variation kan orsaka olika skärproblem i produktionen som skärbarhetsvariation, vibrationer etc. En inledande studie kring olika kort-tids-tester som skulle kunna produktionsanpassas har därför gjorts och ett speciellt borrarprov togs fram för vidare utvecklingsarbete.



Figur 8. Exempel på temperaturkurvor framtagna med den termomekaniska FE modellen. Mätvärdena i figuren är för 0,05 sekunder efter spånningreppet.

När det gäller material och modellering (med fokus på gjutning) har tre centrala frågor varit i mikrostrukturutvecklingen vid stelnandet för CGI jämfört med andra grafitiska gjutjärn, ii) mikrostrukturutvecklingen vid lägre temperaturer vid omvandlingen av austenit till ferrit/perlit samt iii) inverkan av legeringselement och mikrostruktur hos CGI på mekaniska egenskaper (och därmed på potentiell bearbetbarhet). Gjutjärn som CGI genomgår normalt grått stelnande och resultaten har visat variationen i strukturutveckling beroende på stelningshastighet och vikten av faktorer som ympning, behandlingsgrad och godstjocklek har därmed påvisats. Vitt stelnande är något bör undvikas eftersom förekomsten av hårda karbider enligt ovan ger hög verktygs slitage vid bearbetning och också försämrar mekaniska egenskaperna för CGI-materialet. Detta studerades genom så kallade kilprov och studierna visade att risken för vitt stelnande i CGI är ungefär lika stor som för segjärn som i sin tur är känsligare än gråjärn. När det gäller fastfasomvandlingen från austenit till ferrit/perlit har en modell för detta utvecklats för kompaktgråttjärn från modeller för segjärn.

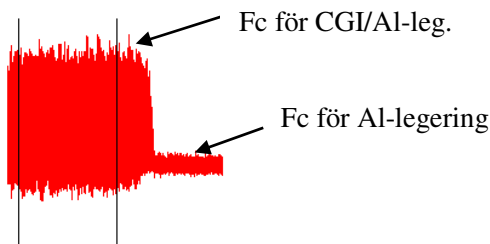
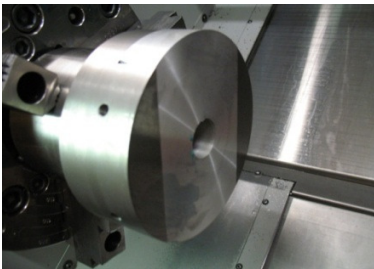
Inverkan av legeringsämnen och svalningshastighet för kompaktgråttjärn har undersökts m h a en termisk analyskopp och sandgjutna dragprovstavar för ett stort antal gjutna CGI-varianter och olika svalningshastigheter. En gemensam slutsats är att legeringsämnena påverkar i hög grad både ferrit- och perlitbildningen som i sin tur påverkar de mekaniska egenskaperna, se Figur 9.



Figur 9. Hårdhet för de 57 olika proven med olika svalningshastighet och legeringsinnehåll kopplat till perlitandel.

## WP3: Sammansatta material

Arbetet i detta delprojekt har inriktats på experimentella bearbningsstudier med modellstrukturer i laboratorium, produktionsutvecklingsstudier samt framtagning av metodik för bestämning av materialdata för modellering av bearbetning med kommersiella FEM-program genom kontrollerade ortogonal svarvexperiment och inversmodellering. Figur 10 illustrerar ett experiment där bearbetning av gjutaluminium jämförts med bearbetning av ett sammansatt material (ämne bestående av samma gjutaluminium och kompaktgrafitjärn, CGI), se Figur 37. Som framgår av Figur 11 fås helt olika respons när det gäller skärkrafter i de två fallen. I delprojektet har Volvo Cars arbetat med produktionsutveckling med bearbetning av motorblock i aluminium med ingjutna cylinderfoder i gjutjärn där en bas för fortsatt FoU etablerats.



Figur 10. Arbetsstycke:bimetall, ändsvavning. Figur 11. Skärkraftsvariation: bimetallbearbetning.

Figur 12 beskriver det koncept som framtagits för att bestämma materialmodeller i FE-modellering av bearbningsprocessen. Metoden har framgångsrikt tillämpats på en höghållfast legering (Alloy 718), aluminiumlegeringen AA6082 och ett stål för att ta fram relevanta materialdata, varefter 3D simulering av bearbningsprocessen med programvaran Deform gjorts med resultatet god överensstämmelse mellan predikterade och experimentella resultat. Resultaten visar att FE-modellering kan användas för att simulera skärande bearbetning om det finns en fungerande materialmodell. Tillämpning kan ske på även sammansatta material och utdata från kan användas för att optimera skärdata och välja skärgeometrier.

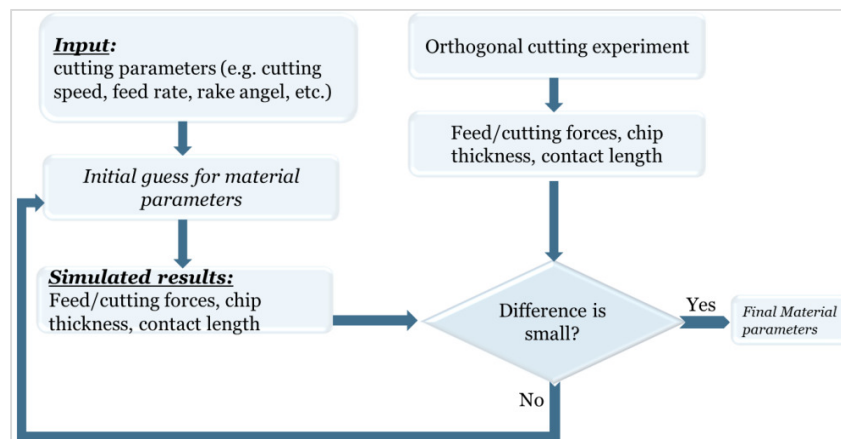


Figure 12. Inversmodelleringkoncept för framtagning av materialmodell för FE-simulering av bearbetning.

## 6. Spridning och publicering

### 6.1 Kunskaps- och resultat spridning

Värt att notera här är att två doktorander (Anders Berglund och Mathias König) har avlagt doktorsexamen inom ramen för projektet och nu är anställda vid Scania CV. En ytterligare doktorsexamen är inplanerad (Varun Nayyar, 1 juni 2012) och Varun Nayyar är vidare från 2012 anställd vid SKF. Doktoranderna Amir Malakizadi och Stefan Cedergren kommer att avlägga licentiatexamen under hösten 2012 och förväntas fortsätta sina doktorandstudier inom ett nytt projekt. Sammanfattningsvis innebär detta att den kunskapsutveckling som åstadkommit inom projektet har kommit till nytta för industrin både i form av tekniskt-vetenskapliga resultat och programkonferenser och särskilt även vid den årliga klusterkonferensen i Katrineholm. Resultat har även presenterats vid den årliga konferensen Swedish Production Symposium (se nedan). För att bredda kunskaps spridningen hos deltagande företag har bredare resultatseminarier genomförts i Skövde och Södertälje. En speciell insats har också varit framtagning av utbildningsmaterial för kunskaps spridning om kompaktgrafitjärns gjutning och bearbetning. Förutom vetenskapliga publikationer enligt nedan har ett stort antal examensarbeten (10st) genomförts.

### 6.2 Publikationer

#### Doktorsavhandlingar

- Mathias König, Microstructure Formation During Solidification and Solid State Transformation in Compacted Graphite Iron. JTH/Chalmers, 2011.
- Anders Berglund, Criteria for Machinability Evaluation of Compacted Graphite Iron Materials: Design and Production Planning Perspective on Cylinder Block Manufacturing. KTH, Skolan för industriell teknik och management (ITM), Industriell produktion, 2011.
- Varun Nayyar, Machinability testing of Materials in Metal Cutting with Focus on Compacted Graphite Iron and Cutting Fluids. Chalmers (disputation juni 2012)

#### Licentiatuppsatser

- Anders Berglund, Characterization of factors interacting in CGI machining – machinability, material microstructure, material physical properties, KTH, Industriell produktion, 2008.
- Gustav Grenmyr, Investigation on the Influence of Nodularity in Machining of Compacted Graphite Iron (CGI), Chalmers, 2008.
- Mathias König, Microstructure Formation and Mechanical Properties in Compacted Graphite Iron, JTH/Chalmers, 2009.

#### Internationella tidskriftsartiklar och konferensbidrag

- S. Cedergren et al., On the Influence of Work Material Microstructure on Chip Formation, Cutting Forces and Acoustic Emission when Machining Ti-6Al-4V, submitted to the 8th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering
- S. Cedergren et al. The Effects of Grain Size and Feed Rate on Notch Wear and Burr Formation in Wrought Alloy 718, submitted to the International Journal of Advanced Manufacturing Technology
- V. Nayyar et al., An experimental investigation of temperature and machinability in turning of compacted graphite irons. Accepted for Int. J. Machining and Machinability of Materials, 2011.
- V. Nayyar et al., Machinability of Compacted Graphite Iron (CGI) and Flake Graphite Iron (FGI) with coated carbide. Accepted for Int. J. Machining and Machinability of Materials, 2011.
- V. Nayyar et al., Temperature in Turning of Compacted Graphite Iron Materials having different Physical properties and Microstructure. Swedish Production Symposium 2011.

- V. Nayyar et al., Machinability of Compacted Graphite Iron (CGI), a Microstructural and Mechanical Properties Comparison Approach. Swedish Production Symposium 2009.
- A. Berglund et al., Effect of carbide promoting elements on CGI material processing. CIRP 2nd International Conference on Process Machine Interactions, Vancouver, 2010.
- A. Berglund et al., The Effect of Interlamellar Distance in Pearlite on CGI Machining. Proc. World Academy of Science, Engineering and Technology, ISSN 2070-3740; 4. 2009.
- A. Berglund et al., Analysis of compacted graphite iron machining by investigation of tool temperature and cutting force. 1st International Conference on Process Machine Interactions: Hannover, Germany. 2008.
- A. Berglund et al., Investigation of the Effect of Microstructures on CGI Machining Swedish Production Symposium, 2007.
- G. Grenmyr et al., Investigation of tool wear mechanisms in CGI machining. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, ISSN 1753-1039. 2011.
- M. König et al., (2011), On Eutectic Growth in Compacted Graphite Iron, submitted to Metallurgical and Materials Transactions A.
- M. König et al., The Influence of alloying elements on Chill Formation in CGI, Proceedings of Science and Processing of Cast Iron – 9, November 9-13, 2010, Luxor, Egypt, pp. 126-31.
- M. König et al., (2011): “Observation and Simulation of White Solidification in Compacted Graphite Iron”, submitted to International Journal of Cast Metals Research.
- M. König et al., Modeling of Ferrite Growth in Compacted Graphite Iron, Proceedings of Modelling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes XII (12th), June 7-14, 2009, Vancouver, Canada, pp. 505-12
- M. König et al., Influence of Alloying Elements on Microstructure and Mechanical Properties of CGI, International Journal of Cast Metals Research, 2010, 23, no. 2, pp. 97-110.
- M. König et al., The Influence of Copper on Microstructure and Mechanical Properties of CGI”, International Journal of Cast Metals Research, 2010, 22, No. 1-4, pp. 164-67.
- M. König et al., “Literature Review of Microstructure Formation in Compacted Graphite Iron”, International Journal of Cast Metals Research, 2009, 23, No. 3, pp. 185-92.
- A. Malakizadi et al., “An Inverse Algorithm to Determine Material Flow Stress in Metal Cutting Process Using Oxley’s Machining Theory and Surface Response Methodology”, in manuscript.

## 7. Slutsatser och fortsatt forskning

Genom OPTIMA FAS TVÅ har en teknik- och kunskapsplattform skapats där fordonsindustri, övrig industri, högskolor och institut samlas för att kominera generisk kunskapsutveckling och implementeringsstödande insatser för konkurrenskraftig produktion av motorkomponenter och andra avancerade produkter där robust och effektiv maskinbearbetning är central för konkurrensförmågan. Både bred och djup kunskap om arbetsmaterials bearbetbarhet har skapats med fokus på kommande material som kompaktgrafitjärn och svårbearbetbara material. Viktiga frågor för framtiden är att utnyttja den etablerade plattformen i form av kunskap och metoder för att söka nästa generation av material för motorkomponenter med bättre skärbarhet än t ex kompaktgrafitjärn, att utveckla metoder och arbetssätt för produktions- och behovsanpassad bedömning skärbarhet och insatser för att koppla kommande skärbarhetsforskning till systemperspektiv avseende bearbetningsstrategier och hur produktionslinor bör utformas. Centralt är även att fortsätta den inledda kompetensutvecklingen när det gäller



FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

grundläggande aspekter av skärbarheten hos arbetsmaterial inklusive kommande materialsystem som sammansatta material och utveckla kunskap och metodik kring framtagning av fungerande materialmodeller som kan användas i simulering av bearbetningsprocesser. Skärande bearbetning är på grund av sin komplexitet när det gäller termomekaniska förhållanden den process ännu inte kan fysikaliskt korrekt modelleras.

## 8. Deltagande parter och kontaktpersoner

Chalmers: Lars Nyborg (projektledare)  
Hans-Börje Oskarson  
Swerea SWECAST: Henrik Svensson  
Kurt Forsberg  
Sandvik Toling: Ibrahim Sadik  
Novacast: Per-Eric Persson

KTH: Mihai Nicolescu  
JTH: Ingvar Svensson  
Volvo: Jonas Möller, Göran Sjöberg Scania CV:  
Volvo Cars: Håkan Sterner  
Sintercast: Steve Wallace  
Daros (Federal Mogul): Daniel Holmgren



FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

Adress: FFI/VINNOVA, 101 58 STOCKHOLM  
Besöksadress: VINNOVA, Mäster Samuelsgatan 56, 101 58 STOCKHOLM  
Telefon: 08 - 473 30 00