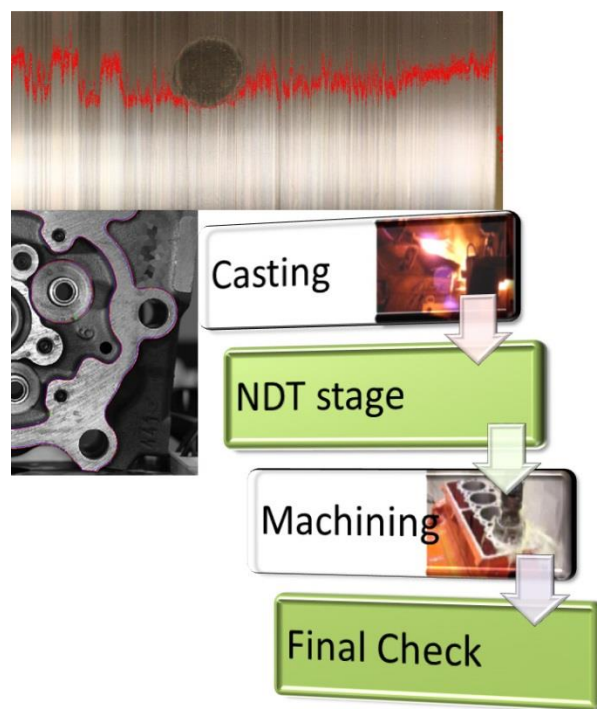




# Non Destructive Testing methods: Development of innovative solutions for in-line applications



Projekt inom FFI Hållbar Produktionsteknik

**Lorenzo Daghini (KTH)** med bidrag av:

Jonas Holmberg (Swerea IVF), Magnus Falkenström (Swerea KIMAB), Lars Nyborg (Chalmers), Eric Tam (Chalmers), Lars Mattsson (KTH), Håkan Wirdelius (Chalmers), Peter Krajnik (Scania).

Datum: 2014-06-16

## Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>Sammanfattning.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Backgrund .....</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Syfte.....</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Genomförande.....</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Resultat .....</b>	<b>5</b>
5.1	WP2 In-line NDT för gjutna komponenter .....	5
5.1.1	Poridentifiering .....	5
5.1.2	Karakterisering av mikrostrukturen .....	6
5.2	WP3 In-line NDT för värmebehandlade komponenter .....	7
5.2.1	Mätningar med Barkhausen Noise metod (BNT) .....	7
5.2.2	Modellering av ultraljud som NDT metod .....	8
5.2.3	Mätningar med Laserinducerad ultraljud (LUS) .....	9
5.3	WP4 In-line NDT för hårdsvärvade komponenter .....	10
5.3.1	Barkhausen noise (BN) .....	11
5.3.2	Ljusspridning (LS) .....	11
5.3.3	Röntgenrestspänningsmätningar .....	12
5.3.4	Optisk mikroskopi.....	12
5.4	WP5 In-line NDT för slipade komponenter.....	13
5.5	Bidrag till FFI-mål .....	15
<b>6</b>	<b>Spridning och publicering.....</b>	<b>16</b>
6.1	Kunskap- och resultatspridning.....	16
6.2	Publikationer .....	16
<b>7</b>	<b>Slutsatser och fortsatt forskning .....</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>Deltagande parter och kontaktperson .....</b>	<b>17</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

Produktkvalitet i biltillverkning bygger på minimering eller eliminering av defekter (oegentligheter, diskontinuitet, fel eller brist) inducerade i olika komponenter under tillverkningsprocessen. Bilindustrin förlitar sig fortfarande mycket på förstörande provningsmetoder för att identifiera sådana fel och kunna producera komponenter som uppfyller kvalitetskraven.

Projektets mål är att utveckla OFP-metoder för att kunna genomföra dessa som en in-line lösning för tidig upptäckt av fel på alla delar som produceras därav göra det möjligt att undvika ytterligare värdeskapande aktiviteter på komponenter som så småningom ska kasseras och få 100% kvalitetskontroll.

Projektet omfattar fyra fall, nämligen gjutna komponenter, värmebehandlade komponenter, hårt svarvade komponenter och slipade komponenter. Flera OFP-metoder har använts för de olika fallen, en del av dessa har genomförts framgångsrikt som prototyp och andra har visat god potential men kräver ytterligare studier och successiv utveckling.

Projektets viktigaste resultat kan sammanfattas som följer:

Gjutna komponenter: en låg kostnad prototyp på visionsystem har utvecklats och testats för att upptäcka yt-och kontur fel. En metod som bygger på akustiska tester har visat sig effektiv för karakterisering av materialegenskaper.

Värmebehandlade komponenter: flera intressanta korrelationer mellan olika signaler som ges av Barkhausen Noise (BN) och materialegenskaper har visats och detta kan öppna för en bredare användning av denna teknik. Fler studier måste genomföras för att till fullo förstå de BN fenomen och göra denna metod användbar som ett kvalitetssäkringsverktyg för härdade komponenter.

Hårt svarvade komponenter: en viktig slutsats från detta arbetspaket är att BN signaler bör integreras med andra tekniker för att kunna karakterisera delarna. En metod har föreslagits. Ändå behövs ytterligare utredning.

Slipade komponenter: undersökning av BN för styrning av värmeskador i slipning av vevaxlar var framgångsrikt och användbart. Resultaten av projektet används som indata till utvecklingen av nya strategier för slipning av vevaxlar. Sist men inte minst en mer detaljerad inblick i vilken typ av BN fenomen skulle vara användbart för att optimera BN magnetisering parametrar för robusta in-line mätning och kvalitetskontroll.

Sammantaget, projektets resultat bidrar till FFI program mål då de testade och implementerade teknik kan användas för att:

- 1 - Förbättra de befintliga OFP-stationer och NDT-förfaranden för att erhålla mer detaljerad information om den producerade delen.
- 2 - Kontrollera 100% överensstämmelse i tidigt skede i produktionslinjen, genom detta undvika slöseri med material och energi på delar som så småningom skulle kasseras.
- 3 - Förbättra industrins egen insikt i de metoder som användes och/eller implementerades.

Ett annat viktigt resultat av projektet har varit att skapa ett konsortium av experter inom området för industriell OFP som inte funnits tidigare.

## 2 Backgrund

Fordonstillverkning i Europa upplever oöverträffad konkurrens på grund av både nya aktörer på marknaden och högre krav på prestanda till kostnadsförhållande. För att vara konkurrenskraftiga på den globala marknaden, de europeiska tillverkarna behöver minska kostnaderna, minska tiden till marknaden och förbättra kvaliteten, samtidigt.



Produktkvalitet i biltillverkning bygger på minimering eller eliminering av defekter (oegentligheter, diskontinuitet, fel eller en brist) som introduceras i olika komponenter under produktionen. Typiska defekter, exempelvis i drivlinekomponenter kan innefatta porositet, olämpligt mikrostruktur, sprickor, ojämn sätthårdning, otillräcklig hårdhet, oönskade restspänningar, slipning brännskador etc. Bilindustrin förlitar sig fortfarande mycket på förstörande provningsmetoder för att identifiera sådana fel och producera komponenter som överensstämmer med kvalitetskraven.

Men detta sannolikhetsbaserade tester, där ett visst antal delar från varje parti måste väljas så att de representerar hela tillverkningsbatcher, för förstörande analys har allvarliga nackdelar såsom:

- dyrt och tidskrävande
- Sannolikheten för att producera komponenter med icke överensstämmande kvalitet

Risker och kostnader i samband med avvikelse-inklusive skrot, omarbete, kostnader för materialupphandling, och klagomål av garanti, produktservice, produktansvar, återkallande av produkter och förlust av anseende-call för ekonomiska och pålitliga strategier för att identifiera brister i tidigt skede i tillverkningsprocesserna. Kvalitetskontroll till 100%, dvs varje komponent testas fullt ut för defekt legitimation istället för prov baserade inspektion, är ett alternativ för att undvika kostsamma avvikelser. Detta tillvägagångssätt är dock opraktiskt i samband med förstörande provning och nödvändiggör användning av oförstörande provning (OFP) metoder därför. Det finns redan flera OFP-metoder som används inom fordonsindustrin för processförbättring och kvalitetssäkring ändamål kvalitet; de är ett genomförbart alternativ för förstörande provning speciellt, för 100% kvalitetskontroll strategi. Detta förutsätter effektiv och ekonomisk implementering av OFP-metoder som bör föras ut ur labbet och installeras in-line. Med andra ord, bör dessa metoder utvecklas på ett sådant sätt att de kan användas (antingen i en automatiserad eller manuell inställning) vid lämpliga skeden av produktionsprocesser för att testa komponenter vid önskad frekvens, men utan att störa produktionsflödet. Tillförlitlighet, robusthet och genomförbarhet bör vara de drivande parametrarna i utvecklingen av dessa industriella lösningar.

### 3 Syfte

De huvudsakliga målen för projektet är att skapa:

1. Industriell tillämpning av befintliga och nya OFP-metoder med en större räckvidd när det gäller fel identifiering och komponenter som testas.
2. Tillförlitliga och robusta OFP lösningar för in-line genomförandet på produktionslinjer för varje fallstudie
3. En stark och effektiv plattform för samverkan mellan forskning och industriella partners för framgångsrika utvecklingen både inom projektet och framtida FoU-strävanden.

### 4 Genomförande

Projektet delades i fem arbetspaket:

- WP1 Projekt koordinering
- WP2 In-line NDT för gjutna komponenter
- WP3 In-line NDT för värmebehandlade komponenter
- WP4 In-line NDT för hårdsvavade komponenter
- WP5 In-line NDT för slipade komponenter

## 5 Resultat

### 5.1 WP2 In-line NDT för gjutna komponenter

Gjutna komponenter såsom cylinderhuvuden, genomgår ett stort antal tillverkningsprocesser, det är därför viktigt att identifiera så snart som möjligt defekter som kan orsaka eventuella problem till kommande operationer och till och med eventuell skrotning.

Arbetspaketet fokuserade på fallstudie baserad på verklig produktion av cylinderhuvud.

Klasserna av defekter som ville identifieras genom in-line NDT i fallet var i princip två:

1. Förekomst av porer.
2. Ogynnsamma mikrostruktur.

Målet var att genomföra identifieringen av sådana defekter så snart som möjligt i produktionslinjen, eventuellt efter gjutning och före skärande bearbetning.

#### 5.1.1 Poridentifiering

Defekterna i gjutjärnskomponenter är främst orsakade av gas porositet och spår av sand kvar från gjutning. Denna typ av fel är mycket bred, från små håligheter och chippade kanter med en längd på några tiondels millimeter fram till stora delar av saknade material. Alltså de metoder som används i algoritmen måste garantera ett framgångsrikt upptäckt av mycket olika typer av defekter (se Fig. 1). Komponenten är uppdelad i regioner med varierande toleranser för tillåtna storlek på felen. Till exempel, i vissa områden brister upp till 5 mm lång och 1,5 mm djupa är godkända medan det i andra områden inga synliga fel får förekomma.

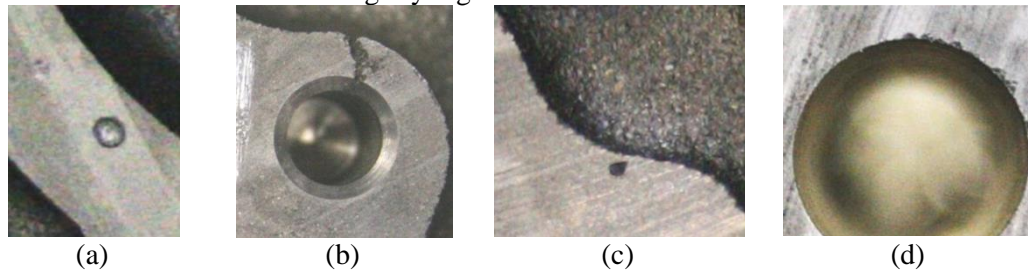


Fig. 1 Olika defekter (a, b), plast föroreningar (c), flisade kanter (som inte anses fel) (d)

Visionsystemet är utformat för att möjliggöra elektronisk kontroll av delar på ett transportband. Transportören är inte kontinuerligt i rörelse, detta möjliggör användning av en enkel stillbildskamera. Med målet att utforma en låg kostnad visionsystem kommer den oundvikliga nackdelen att ha färre möjligheter att styra miljön och med att klara av okontrollerade miljöfaktorer. Algoritmen extraherar konturer och eliminerar falska kanter, buller och icke-viktiga konturer. Ytporerna mäts sedan och jämförs med standarden för att avgöra om en komponent är godkänd eller inte. Därefter kontureras kontrolleras för avvikelser orsakade av porositet. Själv korsningar och tillfällig parallellism kontursegmentet och distansvektor (se Fig. 2 a och b) är ibland svårt att kompensera för. Problemet löstes genom att använda flera punkter runt en del för att skapa signaturer. Prototypen testades med hjälp av en DSLR med 50 mm objektiv och en ring blyxtljus, den har visat att algoritmen är säkerhet kunna upptäcka olika typer av porer, men de använda metoderna är bättre lämpade för att hitta mindre defekter. Systemet beräknar storleken på porerna och kan jämföras med en standard för att nå ett slutligt beslut

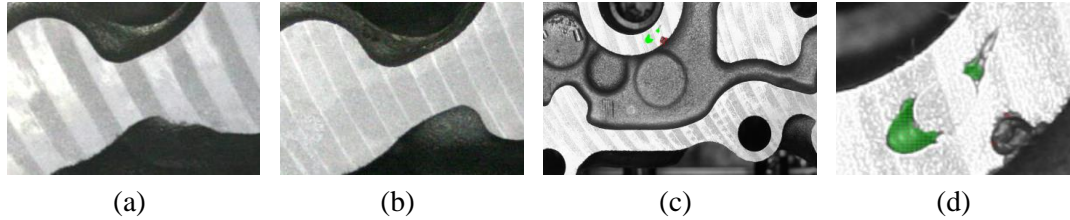


Fig. 2 Naturliga variationer i konturen (a, b). Detekterade defekter (c, d)

## 5.1.2 Karakterisering av mikrostrukturen

Kompaktgråjärn (CGI) är en klass av material som kan tillåta högre förbränningstryck och lättare konstruktion, men material och mekaniska egenskaper kan i stor utsträckning variera inom given specifikation för CGI. Mikrostrukturen bestämmer materialets fysikaliska egenskaper som också påverkar skärbarheten. Att uppskatta frekvenssvarfunktionen (FRF) kan vara en kraftfull metod för klassificering av mekaniska och materialegenskaper.

Denna beräkning kan utföras med användning av resonansinspektionstekniker såsom Impact Acoustic Test (IAT, även kallad Resonant Acoustic Method, RAM). IAT är i grunden experimentell modalanalys förenklats för tillämpning på volymproduktion tillverkning och kvalitetskontroll. Denna teknik fungerar resonans kontroll genom att påverka en del och "lyssna" på sin akustiska spektrala signatur med en mikrofon. Den kontrollerade exciteringen orsakar bredbandsförd energi och mikrofonen möjliggör en beröringsfri mätning av den strukturella svar. De materialtyper och egenskaper hos testprovet är sammanställda i Table 1.

Table 1 Material-och mekaniska egenskaper hos de testade exemplaren.

Material type	Nodularity [%]	Pearlite content [%]	Interlamellar distance in pearlite [nm]	E [GPa]	Yield strength [MPa]	$\epsilon$ [%]	UTS [MPa]
Gray Cast Iron	n.a.	n.a.	n.a.	105 <sup>1</sup>	182	1.3	222
CGI 11	26	85	274	131	330	2.4	471
CGI 14	6	95	248	132	334	2.6	434
CGI 17	29	95	261	143	353	1.6	505

IAT kan lätt skilja gråjärn och de olika CGI som förväntat eftersom deras mekaniska egenskaperna är till stor del annorlunda (se Fig. 3 (a)).

Skillnaderna i mekaniska egenskaper mellan de givna CGI exemplar är mindre märkbara (se Table 1) och detta framgår av den extraherade FRF också (se Fig. 3(b)).

Ändå var IAT kunna skilja CGI 17 från CGI-11 och CGI 14. De två senare kunde inte särskiljas från varandra.

<sup>1</sup> Typical value for Grey Iron.

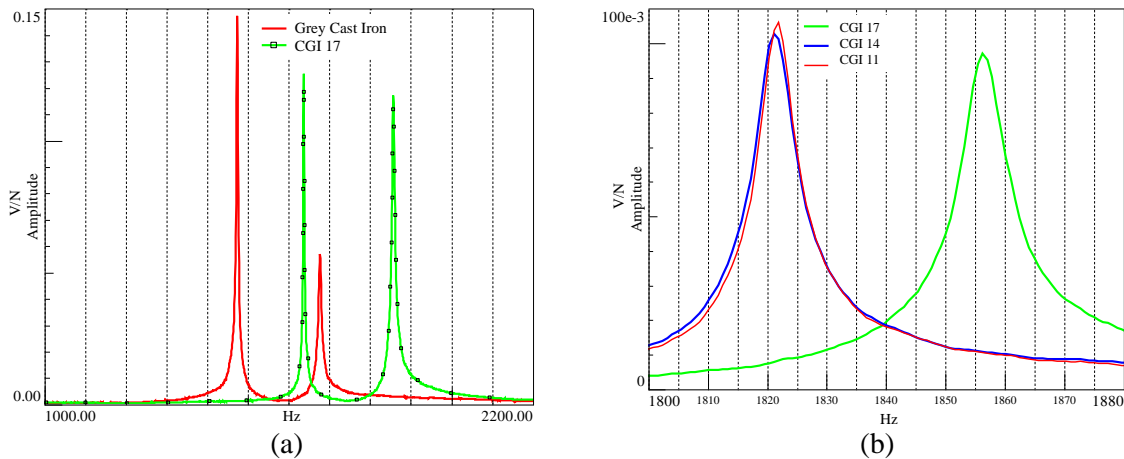


Fig. 3 (a) IAT resultat. Frekvenssvar av Gjutjärn (röd) och CGI 17 (grön). (b) IAT resultat. Frekvenssvar av CGI 11 (röd), CGI 14 (blå) och CGI 17 (grön).

Skärbarheten av CGI är starkt beroende av dess materialegenskaper och studier som genomförts i tidigare forskningsprojekt (OPTIMA) har visat att livslängden kan variera mellan 30 till mer än 180 minuter beroende på material och mekaniska egenskaper. En klassificeringsmetod som IAT kan därför användas för att optimera skärprocessparametrar, som bidrar till högre produktivitet (genom att undvika oväntade driftstopp på grund av plötslig slut av verktygets liv) och lägre miljöpåverkan då verktygen kan användas till fullo.

## 5.2 WP3 In-line NDT för värmebehandlade komponenter

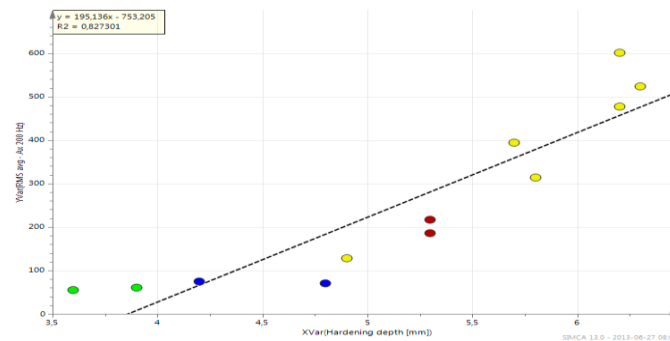
I detta arbetspaket huvudfokus har varit att undersöka tre olika oförstörande provning (OFP) metoder som ett verktyg för kvalitetssäkring i syfte att kontrollera en värmebehandlingsprocess. De olika OFP-metoder är i olika stadier av mognad för att kunna användas som en in-line metod för verifiering av värmebehandling induktionshärdning. Det huvudsakliga målet för detta arbetspaket har varit att utvärdera tekniken djupare för att upptäcka felaktig mikrostruktur, härdjup och restspänningar. Inom detta arbetspaket har ett urval av Volvo Powertrain kamaxlarna använts som fallstudie. Dessa kamaxlar är utformade med sex uppsättning av kamlober bestående av tre olika kamlober som vardera tjänar med en specifik funktion för att driva förbränningen. För en av de studerade kamaxlar, har varje kamlob uppsättning ändrats där den applicerade strömmen till induktionshärdningsprocessen har ökats eller minskats. Detta har genererat en härdnings resultat där förändringar i mikrostrukturen kunde ses i de materialparametrar såsom ythårdhet, fall djup eller restspänningar.

### 5.2.1 Mätningar med Barkhausen Noise metod (BNT)

BNT har varit huvudfokus för detta arbetspaket. Denna metod har flera olika utgångsparametrar av vilka några har rapporterats i litteraturen för att korrelera både hårdheten och härdjup. Initialt undersöktes repeerbarheten för att utreda stabiliteten av de olika Barkhausen brusparametrarna. Resultaten visade hög repeerbarhet om rätt sensorinställningar användes.

För att undersöka BN känslighet för olika mikrostrukturer tre olika material har mätts, induktionshärdade (SS2244), sätthärdade (SS2511) och ett genomhärdade stål (SS2260). Resultaten visade stora skillnader i hur BNT "burst", magnitud samt formen hos hystereslingen såg ut. De initiala BN mätningar på kamaxlarna mättes kring kamloberna. Resultaten visade att varje kamlob har ett maximum i BN-signal för en position runt kamloben som tolkades vara en effekt av en sekundär upphettning från närliggande kamnäsor. Det visade sig också att de olika kamnäsor hade

olika magnituden av BN-signalen. För vidare analys bestämdes det att endast två positioner runt kammens lob bör mätas, det övre och nedre läge. Parallellt med dessa mätningar de materiella egenskaper fastställdes för kamaxeln. Dessa innefattar mätningar av hårdhet, härddjup, kvarvarande spänning, och kornstorlek. Alla dessa uppgifter tillsammans med alla BN parametrar resulterade i ett ganska stort resultat matris. Den inledande analysen av resultaten visar inga tydliga samband. Men i syfte att studera dessa resultat ytterligare ett statistiskt verktyg som kallas multivariatanalys användes. Detta är ett verktyg som gör det enklare att hitta trender i stora datamängder som denna. Denna analys skiljer materialegenskaper från BN-signalen. Efter en analys av de data som en korrelation avslöjades för BN RMS-signalen och härdjupet som visar att BN RMS ökade med ökande härdningsdjup enligt Fig. 4. Detta och andra resultat visade en stor potential för BN-tekniken men det visade också dess begränsningar. Det var tydligt att det var möjligt att hitta användbara korrelationer till materialegenskaper, men det var oklart varför dessa samband kunde påvisas med en NDT-metod som endast har ett begränsat inträngningsdjup och ändå kunde upptäcka en härdningsdjup på flera millimeter. Detta och andra resultat visar att det behövs ytterligare och mer ingående studie av BN fenomen för att fullt ut göra den här metoden användbar som ett verktyg för kvalitetssäkring.



**Fig. 4 Resultaten från analysen av data för alla fem kamaxlar som visar en god korrelation mellan hårdhet djupet av kamaxlar och Barkhausen-brussignalen RMS.**

## 5.2.2 Modellering av ultraljud som NDT metod

En annan NDT metod som utvärderades i detta arbetspaket var modellering av ultraljudsmetod för att undersöka om denna metod skulle kunna vara ett potentiellt alternativ för att bestämma härdjupet på ett icke-förstörande sätt. I ren spridning, är energin i rörelse inte omvandlat till värme; istället avledas det till vågor som färdas i andra än huvudvågen riktningar. Dessa avledade vågor uppträder som slumpmässigt brus och mängden av vågenergi som sprids beror huvudsakligen på storleken av de spridande partiklarna i förhållande till våglängden för ultraljudsvågen. En ultraljudsmetod för att mäta hårdhet djup har tidigare varit tillgängliga på marknaden och byggde på att tillämpa konventionella UT sonder och instrumentering (Qnet, Sonix). Inom en snar framtid är avsikten att implementera tekniken i process integrerade mätningar kompletteras med information om t.ex. ythårdhet och kornstorlek. Tidigare erfarenheter visade på god korrelation mellan uppmätta djup och faktiska djup hittats av destruktiva undersökningar. Det är uppenbart att om metoden ska tillämpas för in-line mätningar måste den baseras på bättre teoretiska kunskaper om ultraljuds vågutbredning i ytan härdade komponenter. Grundad på tidigare erfarenheter, har inledande simulering gjorts för att illustrera hur detta koncept skulle kunna användas i utvecklingen av en icke förstörande karakterisering teknik (NDC). Strålen spridning kan simuleras genom att använda en grundlig validerad modell av sändare och mottagare och därmed skiljas ut från de delar som faktiskt är relaterade till materialet. Eftersom både absorption (dvs. viskös dämpning) och kornspridning har samma typ av



påverkan ( $e-\alpha x$ ) på amplituden blir det viktigt att utveckla ett ultraljuds metod som skiljer mellan dessa båda företeelser. En hypotes är att använda återspridda informationen i en uppskattning av de kornstorlekar och använda detta som ett antagande i analysen av ultraljudsenergi som har reflekterats mot bakväggen en eller vid ett antal tillfällen. Det senare är en konventionell teknik känd som överföringsdämpningsmätning och antalet decibel mellan två intilliggande signaler mäts och värdet divideras sedan med tidsintervallet mellan dessa. Denna beräkning ger en dämpningskoefficient i decibel per tidsenhet. För att validera huruvida den sfäriska integration skulle kunna användas som ultraljudsspridnings representanter till enskilda korn spridning i ett statistiskt perspektiv en kontrollvolym ( $10 \times 10 \times 10$  mm) implanterades med slumpmässigt fördelade inneslutningar i olika storlekar (dvs.  $\varnothing = [0.9\varnothing, 1.1\varnothing]$ ). Fyra olika storlekar av inklusioner användes ( $\varnothing = 20, 50, 100$  och  $200 \mu\text{m}$ ) och två olika puls-eko-sond med olika frekvenser skannar ytan ovanför volymen. Ett sfäriskt hålrum (diameter =  $0,1$  mm) infördes som ett kalibreringsobjekt. Resultaten från simuleringarna visar på möjligheten att använda simulering i utvecklingen av ett ultraljud förfarande som uppskattar härddjupet. Nästa skulle vara att experimentellt validera modellen och använda modellen för att identifiera möjliga probtekniker och optimera en sådan set-up.

### 5.2.3 Mätningar med Laserinducerad ultraljud (LUS)

De härdade kamaxlar undersöktes med laser ultraljud. Denna teknik har fördelen att den kan komma åt och mäta relativt oregelbundna geometrier. Ultraljudet kan också induceras i materialet på ett mycket litet område, ner till  $200 \times 200 \mu\text{m}$ , och genom det möjliggöra lokala variationer på små skalor som ska undersökas. Tanken var att se om LUS kan användas för att mäta både härddjup och också säga något om kvaliteten på det härdade skiktet. Två experimentella metoder undersöktes och utvecklades i projektet. En metod var att försöka detektera ultraljudets reflexion från gränssytan mellan det härdade och det ohärdade partiet av ytan (Fig. 5a). I teorin borde de små kornen i den härdade delen i princip vara transparenta för ultraljud, medan de större kornen i bulk reflekterar/diffraktera ultraljud tillbaka till ytan. Tyvärr, vi kunde inte upptäcka någon eko från gränssnittet (Fig. 5b). En annan metod är att mäta ultraljudshastigheten hos en våg som färdas längs provets yta. Dessa Rayleigh-vågor penetrerar också provet med ett djup av ca en våglängd (fig. 6 a). En smart detalj med laser ultraljud är att den korta generations puls betyder att ett brett spektrum av ultraljudsfrekvenser från ungefär 1 till 100 MHz genereras momentant i varje mätning. Med hjälp av wavelet-analys kan ultraljudshastighet vid olika frekvenser extraheras från råsignalen.

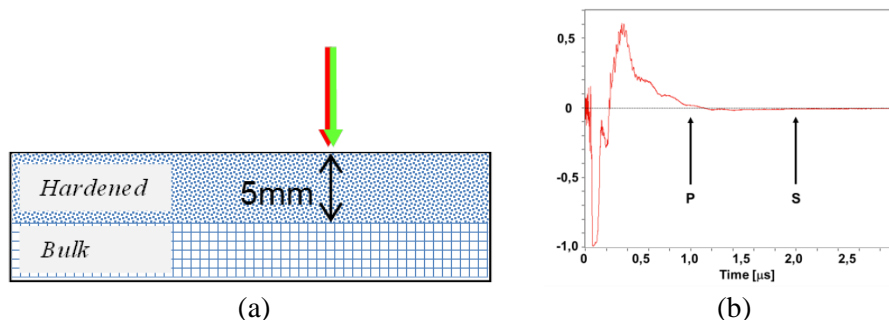


Fig. 5 a) Schematisk bild av ett härdat prov påkörd av en generation laser (röd pil) och en detektionslaser (grön pil). Den svarta dubbla pilen visar hur en ultraljudspuls kunde resa i provet. b). Ultraljudssignal från en kamaxel (A-scan) mätt med den experimentuppställning representerad i ett). Inget eko från gränssnittet syns varken för longitudinella vågen (P) eller den tvärgående våg (S).

Det är känt att ultraljudshastighet påverkas av väsentliga parametrar såsom hårdhet, inre spänning och mikrostruktur. Eftersom olika frekvenser penetrerar provet mer eller mindre, kan information från flera olika skikt av provet som skall jämföras. Fig. 6b visar de första resultaten av denna metod på de sex kammar märkta U1-U6. Även kan urskiljas några skillnader mellan kammarna och ultraljudsfrekvens, var det inte möjligt att se tydliga trender som korrelerade med processparametrar och förstörande provning.

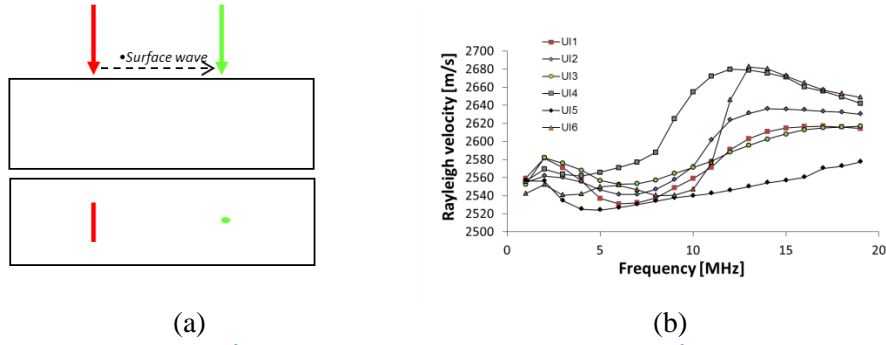


Fig. 6 a). Provuppställning för ytvågor analys. Den övre bilden visar provet från sidan med den generation laser (röd pil) och detektionslaser (grön pil) träffar ytan ovanifrån. Den undre bilden visar provet från ovan. Den generation är fokuserad som en linje för ultraljudsvågen att täcka upp en större volym. b). Resultat av "wavelet analys" av ytvågor. Figuren visar ljudhastigheten som funktion av ultraljud frekvens för sex cams U1-U6.

### 5.3 WP4 In-line NDT för hårdsvavade komponenter

In-line icke-förstörande utvärdering av ytans mikrostrukturella förändringar på de hårdsvavade stålkomponenter är fallet i detta arbetspaket. På dessa bearbetade ytor kan det observeras mikro förändringar på och strax under ytan, beroende på skärets skick. Den oönskade maskin-inducerad yta "vitt skiktet" är av intresse i detta arbetspaket. Det är viktigt att veta hur man kan undvika detta skikt samtidigt som det är av betydelse förstå hur man kan tillämpa lämpliga NDT tekniker för att utföra denna övervakning.

AISI 52100 stål var det studerade materialet. Två uppsättningar av proverna framställdes för att ha härdat martensitiska strukturer (M-serien) och bainitiska strukturer (B-serien). I varje provuppsättning, tillämpades olika bearbetningsförhållanden för att skapa den ytanintegriteten enligt med matrisen för den experimentella utförande som visas i Fig.7. Färförslitning (VB) och skärhastighet (vc) valdes som variabla faktorer. Skären var PCBN. Slitaget av skären infördes genom att använda dessa verktyg på andra arbetstycke med en jämförbar diameter före finbearbetningsstadiet. Emulsion tillämpades under bearbetningen

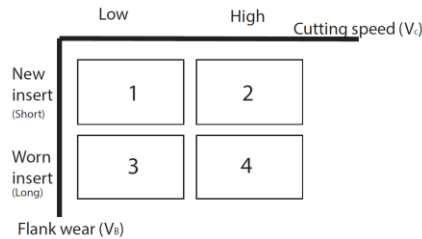


Fig. 7. The varied testing parameters and the corresponding sample numbering.

OFP-metoder som tillämpas i denna studie inkluderar Barkhausen noise (BN) och ljusspridning (LS) tekniker.

## 5.3.1 Barkhausen noise (BN)

Tillämpningen av Barkhausen-brus (BN) för materialkaraktisering utförs genom att använda sig av den magnetiska domänens rörelse i materialet när ett externt magnetiskt fält läggs på det testade provet. Instrumentet som användes var en Stress Rollscan 300 Digital Barkhausen Noise Analyser. För att åstadkomma "vitt skikt" mätning, användes tre prober med olika magnetiserande strömmen och den magnetiserande frekvensen och magnetisering spänning ställdes in på en relativt hög nivå, t ex 1000 Hz och över 12 V, i syfte att erhålla BN-signalen från den översta ytan. Andra parametrar, bland annat analysens filterområde, var antalet analyserade "bursts" och samplingsfrekvens inställd på 25 till 600 kHz, 20 och 2,5 MHz, respektive. För att öka tillförlitligheten, var varje rapporterat data som erhöles genom mätningar från minst 3 gånger på 4 olika positioner.

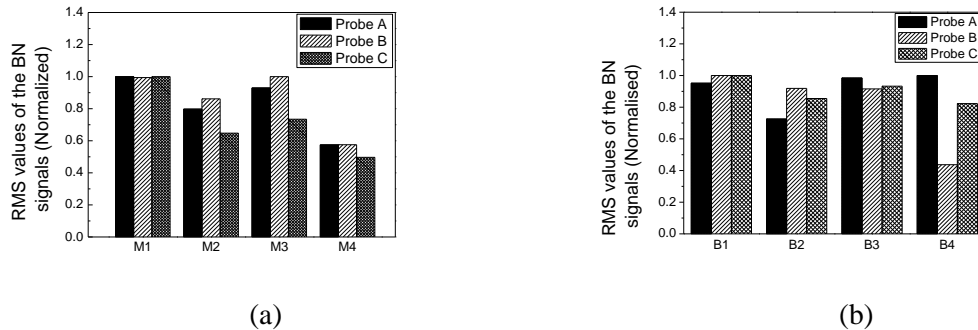


Fig. 8 The normalized RMS values of the investigated samples from three different probes (1000 Hz).

## 5.3.2 Ljusspridning (LS)

Ytans mikro- och nano-topografi påverkar starkt den reflekterade ljusfördelning och detta kan användas som ett fingeravtryck för höjdvariationer och rumsliga frekvenser i ytan. Fotodetektorn fångar det spridda ljuset var antingen en Si-fotodiod eller en digital kamera försedd med ett makroobjektiv. En laserdiod som arbetar vid 635 nm våglängd användes som ljuskälla, belysning av ytan med en sned vinkel. Ett exempel på kameran infångade ljusspridning från de fyra M1-M4 ytor visas i Fig. 9. För M1, det fanns nästan ingen spridning, medan M4 ytan skapade en betydande spridning. För att avgöra om denna spridning är relaterad till det vita lagret eller bara slitaget på skäret, behöver fler undersökningar göras. Förutom den ljusspridande ytojämnheten uppmättes enligt ISO-standard med en Zygo vitt ljus interferometer vid fem punkter på varje prov. Den visar ingen tydlig relation mellan proven med Ra intervallet mellan 0,30 till 0,50  $\mu\text{m}$ . Men standardavvikelserna i M1 och M2 är mindre än de i M3 och M4. Det är då slutsatsen att de slitna skär ökar variationen i Ra över spåren.

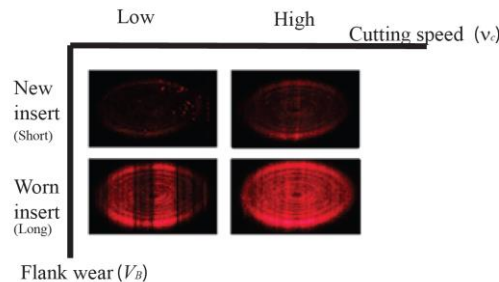


Fig. 9 Bilder av ljusspridning av de fyra martensitiska prover. Belysning erhålles från en röd laserdiod (635 nm) belysning ungefär 5 mm från ytan i den axiella riktningen.

### 5.3.3 Röntgenrestspänningsmätningar

Restspänningsanalysen genomfördes med hjälp av en Stresstech XStress X3000 G2R utrustad med en CrK $\alpha$  källa ( $\lambda = 2.2897\text{\AA}$ ). De ytnära restspänningsnivåerna på de bearbetade proven (både M-serien och B-serien) är plottade i Fig. 10. För de fräska skären (oberoende på typ av material, skärhastighet och riktning av XRD-mätning) mättes för det mesta kompressiva restspänningar. Bearbetning med de slitna skären, gav upphov till dragrestspänningar vid ytan, vilket är typiskt för vita lager.

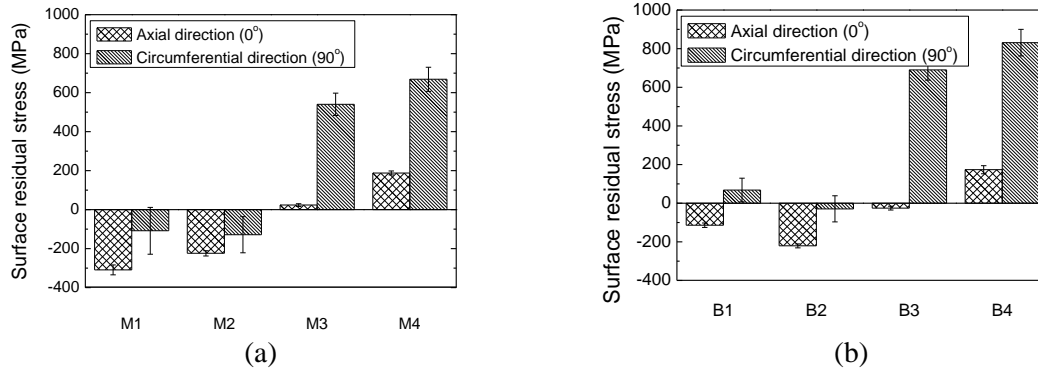


Fig. 10 Ytans restspänningsnivåer som erhöles med hjälp av XRD-mätningen.

### 5.3.4 Optisk mikroskopi

Optisk mikroskopi användes för att undersöka tvärsnittsmikrostrukturen hos den bearbetade ytan (se Fig. 11). Mikroskopet som användes var en Leica Letz DMRX utrustad med en AxioCam MRC5 kamera. Den mikrostrukturella utredningen undersöktes ytorna längs den axiella (foder) riktning. Den mikrostrukturella studie visar att inget vitt skikt (kontinuerligt eller diskontinuerligt) visas på de prover som bearbetas av fräska skärinsatser, dvs M1 och M2 samt B1 och B2. Samtidigt var enhetliga och enfärgat vitt skikt observerades på de ytor bearbetas av skär med överdrivet verktyg fasförslitning, dvs M3 och M4, samt B3 och B4. Således har det visat sig att mikrostrukturella förändringar sker endast i den valda bearbetningstillstånd, det vill säga skär med betydligt längre fasförslitning. För att integrera denna information med andra karakteriserade egenskaper, finner man att prover utan och med diskontinuerliga vitt lager karakteriserades ha tryckrestspänningar, medan ytor med kontinuerliga vita skikt visade hög restdragspänningar på ytan. Trots detta är det fortfarande svår att bestämma ytegenskaper via BN metod eftersom det är känt att den förvärvade RMS-värdet består av flera materialegenskaper samt egenskaper som mikrostruktur (faser och kornstorlek), hårdhet och restspänningar.

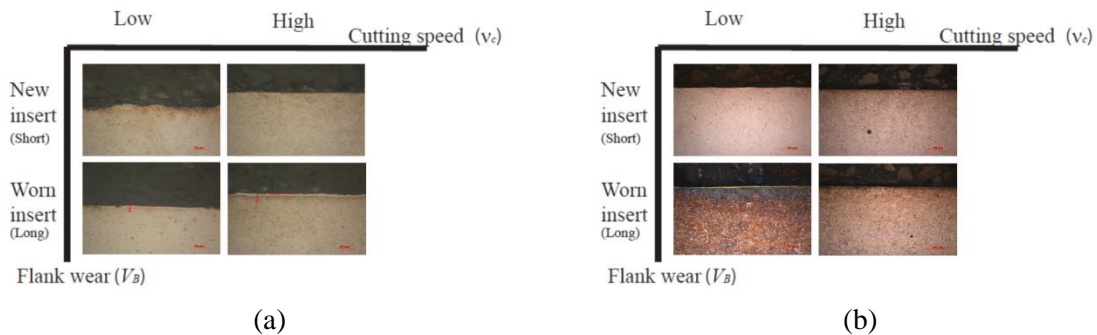


Fig. 11 Cross-section of (a) M-series and (b) B-series after machining.

Som ett resultat av ett försök att samla de experimentella resultat som erhållits från andra metoder såsom ljusspridning, röntgenspänningsanalys och optisk granskning och jämförde dem med detta RMS-värde gjordes. En empirisk funktion har fastställts som visas i ekvation (1).

$$\text{BN signal} = \frac{\text{Tensile stress level}}{\text{Compressive stress level} \cdot \text{Layer thickness} \cdot \text{Ra-range}} \dots (1)$$

Ytterligare forskning behövs för att skapa en mer förfinad fysisk modell för att förstå hur dessa olika aspekter av ytintegritet korrelerar med BN-signal. Samtidigt behövs det en statistisk modell från experimentella data, för bättre förståelse av BN tekniken och uppnå den ultimata in-line tillämpning.

## 5.4 WP5 In-line NDT för slipade komponenter

Målen med denna aktivitet var att undersöka möjligheten att tillämpa olika NDTs för att identifiera och klassificera olika typer av termiska skador, såsom härdning, uppkomsten av dragspänningar och återhärdning, som kan förekomma i industriell slipning (på verkstadsgolvet, in-line). Resultatet blev en förbättrad NDT-lösning, baserad på BNT som redan genomförs i produktionslinjen. Huvuduppgiften för WP5 var att köra en uppsättning av sliptester för att reproducera olika typer av termisk skada. Använda Barkhausen Noise (BN) teknik för att identifiera olika typer av skador och att utveckla slipbränntröskelscheman.

Fördelarna med BN-teknik är följande:

- Utrustning finns på Scania (integrerad i-linje med produktionen).
- Mätning är kort, process ganska robust, vilka är de stora fördelarna med denna teknik för industriell tillämpning.
- BN instrumentet fungerar som en komparator (kvalitativa värden) och kräver kalibrering med de temperaturer och olika typer av termiska skador i slipning.
- Som en praktisk fråga, vårt mål var att direkt tillämpa denna metod för att identifiera olika typer av termiska skador (anlöpning och uppkomsten av dragrestspänningar vid slipning av vevaxlar).

De undersökta faktorer som påverkar processen och dess resultat var: (1) arbetsstyckets material, (2) matning av slipprocessen (som påverkar avverkning - produktivitet samt ytintegritet), och (3) överlappning förhållande av omskärpnings processen (påverkar arbetsstyckets kvalitet - ytintegritet). Slipningsprocessen karakteriserades genom att mäta slipningseffekten och beräkning av specifik energi. Dessa två parametrar är de viktigaste parametrar som används i en industriell slipning forskning. Alla slipningstester som behövs för att uppnå projektresultaten utfördes på Scania, med hjälp av in-line produktionsutrustning och förglasat CBN slipskivor. Bedömningen av resultaten genomfördes på Scania (BN) och vid Stresstech Oy anläggningar i Finland (analys av restspänningar).

Dressing har en stor effekt på slipning kraft och specifik energi (som övervakas parallellt). Målen för denna deluppgift var följande:

- Analysera effekten av att klä på Barkhausen buller
- Analysera påverkan av materialavgift på slipresultat
- Analysera effekten av dressing på slipning kraft
- Analysera effekten av dressing på specifika slipning energi
- skatta effekterna av dressing och material på sliptemperatur

Olika hjulkretsmönster har skapats av förbandet processen, det vill säga genom att ändra dressing överlappningsförhållandet. På detta sätt hjul som används för testning varierade från slitna att mycket skarp

Vi har fått reda på att dressning processen påverkar avsevärt de uppskattade sliptemperaturer (som beräknats med hjälp av Jaegers rörliga värmekälla teori). Samtliga temperaturer är sannolikt att orsaka uppkomsten av dragrestspänningar och i extremfallet ( $U_d = 10$ ) för slipning med en slitna hjulet en eventuell rehardening. Intressant, materialförsörjning var också sannolikt att påverka sliptemperaturer (och termisk skada). Denna situation är långt ifrån optimalt för industriell slipning, därför effekten av materialet undersöktes vidare. I nästa steg experiment var utformade för att utföra den här ingående undersökning.

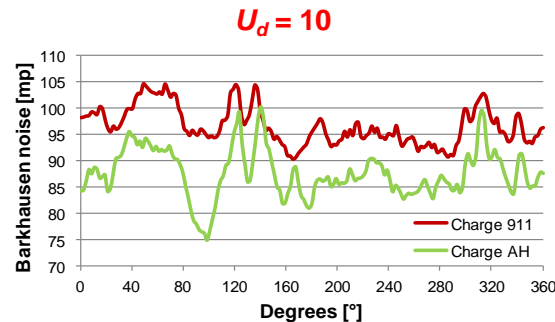


Fig. 12 Effekt av material batch på BN mätningar.

Resultaten av BN mätningar bekräftade att materialets laddning påverkar signifikant dessa mätningar visas i Fig. 12. Denna OFP-teknik visat sig vara mycket tillförlitliga i att spåra de nya tendenserna i BN-signalen runt omkretsen av den slipade komponenten.

Följande slutsatser har dragits:

- BN nivåerna är högre vid slipning Charge 991 jämfört med slipning av Charge AH. Signifikant effekt av materialets Charge.
- Ökningen hos BN medelvärden för Charge 991 när vi flyttar till dressning med högre överlappningsförhållanden skulle kunna förknippas med materialets förmjukning (vanligt hjul) och uppkomsten av restdragspänningar (slitet hjul). Den lägsta observerade genomsnittliga BN värde förknippas med slipning med ett slitet hjul (eventuellt återhärdning).
- Samma tolkning kan inte göras för de uppmätta genomsnitts BN värden för Charge AH. Resultaten verkar mer slumpmässiga. Detta skulle kunna förknippas med lokala variationer i materialet eller bearbetningshistorik. Olika typer av termiska skador kunde inte identifieras.
- Standardavvikelsen mellan de fem på varandra följande BN mätningar på Charge AH var ca 4.

Termisk skada är en av de viktigaste faktorerna som påverkar arbetsstyckets integritet och begränsar produktionstakten som kan uppnås genom slipning, så det var särskilt viktigt att förstå de bakomliggande faktorer som påverkar sliptemperaturer. Detta fallstudie handlade om slipning av vevaxlar (ett material batch). Målen med studien var följande:

- Analysera effekten av slipprocessen på termisk skada av vevaxelns huvudlager
- Undersöka variant av BN runt omkretsen av elnätet
- Undersöka variant av BN runt med avseende på material sats
- Värdering korrelation mellan termisk skada och BN-värden
- Test BN mätningar in-line (Rollscan) och off-line (Microscan) lägen

Experiment utfördes ut för att skapa olika slipbränning scenarier.

De testade fallen, som grundas på parametrar som normalt används i produktionen, gav liknande resultat BN mätningar. Så tekniken inte är tillräckligt känslig för att skilja mellan de olika typerna

av termisk skada. Trots det mest extrema scenariot gav högre värden av BN, vilket sannolikt är förknippade med allvarliga kvarstående dragspänningar. Repeterbarheten av mätningarna var tillräcklig.

Liknande resultat erhöles med laboratorie BN mätningar med Rollscan 300 - Microscan programvara. Endast ett fall ( $Q'w = 49,6 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ) skiljer sig markant från de andra. Detta bekräftar in-line mätningar av BN-nivåer i real produktion.

För att bekräfta de erhållna BN mätningarna mättes restspänningar hos Stresstech i Finland. Restspänningsprofilen för den svåra slipningfallet ( $Q'w = 49,6 \text{ mm}^3/\text{mm s}$ ) avslöjar en hög nivå av restdragspänningar som når upp till 680 MPa.

De extra materialundersökningar vid Scania's materiallabb bevisade frånvaron av återhärdning. Därför ingen signifikant nedgång i BN observerades. Baserat på denna undersökning, kan följande slutsatser dras:

- Slipning tester utformades för att generera olika typer av värmeskada (i kvasi temperaturintervall mellan 526 till 1058 ° C).
- Den maximala ökningen av slipning makt var 400%. Upp till 85% av den tillgängliga spindel effekt (63 kW) användes för att tillverka slipbrännings scenarier.
- BN nivåer för de fyra slipningstester är likartade. Baserat på resultaten, är omfattningen av termiska skador liknande.
- Ökningen BN nivån för femte slipning scenariot är 20%. Ökningen är sannolikt förknippade med uppkomsten av restdragspänningar.
- BN "bursts" analyserades också med hjälp av Microscan. Erhållna resultat är desamma.
- Ytterligare mätningar röntgengenomfördes för att analysera restspänning och restaustenit.

Ingen åter härdning observerades

Sammantaget utredningen av BN för styrning av värmeskador i slipning av vevaxlar var framgångsrikt och användbart. Resultaten av FFI OFP projekten används som indata till utvecklingen av nya strategier för slipning av vevaxlar. Sist men inte minst en mer detaljerad inblick i vilken typ av BN fenomen skulle vara användbart för att optimera BN magnetisering parametrar för robusta in-line mätning och kvalitetskontroll.

## 5.5 Bidrag till FFI-mål

- 30% högre produktivitet:

Resultaten från detta projekt bidrar alla till ett sådant mål. Den OFP karakterisering av materialegenskaper i förväg via IAT och eller BNT kan tillåta processoptimering. Utöver detta tidig upptäckt av defekta delar via visionsystem gör det möjligt att inte slösa produktionstid på delar som skulle ändå kasseras.

- 30% mindre miljöpåverkan i tillverkningsprocesserna:

Inte slösa produktionstid på defekta delar innebär också att inte slösa energi. Att ha ett pålitligt verktyg för att karakterisera materialegenskaper kommer att drastiskt skära ned behovet av förstörande provning, vilket minskar materialspill.

Den kunskap och prototyper som utvecklats i detta projekt har stor betydelse för alla svenska tillverkningsindustrin, små, medelstora och stora företag. Till exempel, teknikerna som studerades och implementerades i WP2 ger möjlighet att använda låg-kostnad utrustning för feldetektering och/eller materialkarakterisering, möjliggör helt automatiserad kontroll av delarna till en rimlig kostnad. Tack till offentlig spridning av resultaten en kunskapsbas är också tillgänglig

## 6 Spridning och publicering

### 6.1 Kunskap- och resultatspridning

The project results have been disseminated through seminars within the project consortium and academic publications presented at international conferences.

Seminar 1: 13 April 2011, at SKF Headquarters in Gothenburg, Sweden

Seminar 2: 2-3 September 2013, at Scania Headquarters in Södertälje, Sweden

### 6.2 Publikationer

Bergqvist, A. (2011). Oförstörande provning in-line: Säkerställande av produktionskvalitén vid gjutning av cylinderhuvuden. (Examensarbete). KTH.

Daghini, L. & Berglund, A. (2013). Impact Acoustic Testing as NDT Method for Classification of Compacted Graphite Iron. In: Archenti, Andreas; Maffei, Antonio (Ed.), Proceedings of the International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies. Paper presented at NEWTECH 2013, the International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies; Stockholm, Sweden 27-30 October, 2013 (pp. 293-302). Stockholm: KTH Royal Institute of Technology.

Tam, P. L., Hosseini, S. B., Holmberg, J., Lundin, P., Mattsson, L. & Nyborg, L. (2013). A study of the surface integrity after machining by means of non-destructive testing methods. In: A. Archenti and A. Maffei (Ed.), Proceedings of the International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies. Paper presented at NewTech 2013 conference, Oct 27-30, 2013, Stockholm (pp. 283-292). Stockholm: KTH Royal Inst of Technology.

Eshetu Tefera, Z. (2014). Impact Acoustic Testing for Classification of CGI Mechanical and Material properties. (Examensarbete). KTH.

Kiviorg, A. (2014). Development of a Low-Cost Vision System for finding Contour and Surface Defects on Cast Iron Engine Components. (Examensarbete). KTH

## 7 Slutsatser och fortsatt forskning

De kunskaper och erfarenheter som erhållits under projektet tillsammans med de utmaningar som uppstått och nya industriella krav har lagt grunden för att formulera nya utmaningar i det nya projektet FFI OFP4p ("Oförstörande Provning för Produktion"). Det huvudsakliga målet för FFI OFP4p är att ge en djupare förståelse för fysiken bakom BNT (redan i stor utsträckning används inom bilindustrin), vilket gör utvinningen av en större mängd information om de testade komponenterna materialegenskaper med högre tillförlitlighet. Slutmålet är att minimera förstörande provning av komponenter samt göra det möjligt att snabbt bedöma bearbetbarhet arbetsstycken innan de når de givna processer, vilket möjliggör en optimering av processen i förväg.





## 8 Deltagande parter och kontaktperson



SCANIA



SKF



CHALMERS

swerea|IVF

swerea|KIMAB



konaktperson: Lorenzo Daghini ([m2daglor@kth.se](mailto:m2daglor@kth.se) , 08 790 9023)



FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

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