

# FFI

FORDONSSTRATEGISK  
FORSKNING OCH INNOVATION

## Optimering av kontaktytor och materialval för avgasventilsäten och ventiltallrikar för miljövänliga lastbilsmotorer



## Slutrapport

Delprogram: Fordonsutveckling

Staffan Jacobson  
Ångströms tribomaterialgrupp  
Uppsala universitet  
28 januari 2013



UPPSALA  
UNIVERSITET

## Innehåll

<b>1. Sammanfattning.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Bakgrund .....</b>	<b>3</b>
<b>3. Syfte.....</b>	<b>4</b>
<b>4. Genomförande.....</b>	<b>4</b>
<b>5. Resultat .....</b>	<b>5</b>
5.1 Bidrag till FFI-mål .....	5
5.2 Konkreta resultat .....	6
<b>6. Spridning och publicering.....</b>	<b>10</b>
6.1 Kunskaps- och resultatspridning .....	12
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

Projektet har syftat mot att ge Scania den ökade kunskap som är nödvändig för att optimera materialkombinationerna i ventil/ventilsätets-kontakten. Speciellt måste Scania parera de problem med nötning och vidhängande verkningsgradsförlust som uppkommer när flödet av partiklar genom ventilerna minskar, vid sker vid anpassningen till Euro 6. Dessa kunskaper stärker Scantias position för framtida utveckling av ventilsystemet och ger en bättre förbättrad position vid dialogen med underleverantörer.

Projektet har utförts i nära samarbete mellan Scania CV och Tribomaterialgruppen vid Uppsala universitet. Scania-gruppen har letts av Åsa Gustafson med medarbetare från den mest relevanta avdelningen inom konstruktion och provning. Uppsalagruppen har haft en sammansättning bestående av en doktorand (Peter Forsberg), en senior forskare (Patrik Hollman) och tribomaterialgruppens forskningsledare (Staffan Jacobson).

Forskningsmässigt har Uppsala stått för mikroskopiundersökningarna, ytanalys, konstruktion och intrimning av provrigg, framtagning av provmetodik, samt körningar i provriggen. Uppsala har vidare, i samråd med Scania, ansvarat för publikationer och presentationer vid öppna seminarier och konferenser.

Scania har först guidat Uppsala in i ventilsystemens komplexa värld och under hand tagit fram ”verkliga” nötta ventiler från fältprovningar och motorcellkörningar vid Scantias teknikcentrum, nya ventiler och säten för körningar i Uppsalas rigg, data kring ventilsystemens detaljerade geometri, mm.

Projektet har varit mycket framgångsrikt och genererat värdefull ny kunskap, främst om de emitterade partiklarnas stora skyddande inverkan i ventilsystemen där de bildar nötningsminskande filmer, hur dessa filmer byggs upp och hur höga krav som måste ställas på system som ska fungera utan partikelflödet. Vidare har en ny effektiv provutrustning och provningsmetodik utvecklats. Resultaten har presenterats vid en rad konferenser och i vetenskapliga tidskrifter. Vidare har projektet resulterat i ett väletablerat och effektivt samarbete mellan de involverade personerna på Scania CV och vid Uppsala universitet.

## 2. Bakgrund

De tribologiska förhållandena för avgasventiler i tunga dieselmotorer blir allt svårare. Paradoxalt nog är det de allt högre kraven på låga emissioner som leder till detta. Ventilerna (kontaktytorna mellan sätet och ventilen) utsätts för slagpåkänningar och kort glidande kontakt, under höga temperaturer i korrosiva atmosfärer. Ytorna i denna besvärliga kontakt har tidigare skyddats av de beläggningar som spontant byggs upp av sot, svavelföreningar och rester av smörjolja och bränsle. Dessa beläggningar kallas här tribofilmer [6, 8].

Med de extrema krav på avgasrenhet som är på väg att införas, måste källorna till dessa mikroskopiska partiklar och föroreningar kraftigt minskas eller helt elimineras, och följaktligen kommer flödet ut genom ventilen inte längre att erbjuda råmaterialet till den skyddande beläggningen/tribofilmen.

Det måste då förväntas att nötningen av ventilkontakten ökar påtagligt, på samma sätt som redan erfarits till exempel i motorer drivna av komprimerad naturgas.

Förutom att utgöra ett rent livslängdsproblem, leder den ökade nötningen till försämrade förbränningsförhållanden, vilket i sin tur leder till renhetsproblem. Orsaken till denna försämring är att – den från början optimerade – volymen i förbränningsrummet växer när ventilerna måste föras allt längre upp i sätet för att tätas. Dessutom blir strömningsmotståndet när ventilen öppnas högre. Båda dessa förändringar sänker verkningsgraden i motorn.

Vidare är skillnaden mellan bränslena och även motoroljornas additiv stor mellan olika marknader med olika regelverk, vilket ytterligare ökar kraven på grundläggande förståelse för att kunna göra robusta val av geometri, material och ytor i ventilkontakten.

Enligt Euro 6 och senare så måste emissionerna hållas låga under hela motorns livslängd, vilket medför att ökade kunskaper inom området är av yttersta vikt för Scania.

Det är mot denna bakgrund som projektet utförts och även en ansökan om en förlängning/utvidgning av projektet söktes och erhöles.

Projektet startade med ett första möte mellan parterna Scania CV och Tribomaterialgruppen på Uppsala universitet i mars 2010 och det sista projektmötet hölls i december 2012. Ett uppföljande möte och seminarium där resultaten presenteras för en större grupp på Scania är planerat till den 17 februari 2013. Fas 2 av projektet är redan i full gång.

### 3. Syfte

Projektet har syftat mot att ge Scania den ökade kunskap som är nödvändig för att optimera materialkombinationerna i ventil/ventilsätets-kontakten, speciellt med avseende på att undvika de problem med nötning och vidhängande verkningsgradsförlust som uppkommer när flödet av partiklar genom ventilerna minskar, vid anpassningen till Euro 6. Dessa kunskaper stärker Scantias position för framtida utveckling av ventilsystemet och ger en bättre förbättrad position vid dialogen med underleverantörer.

Vidare ska framtagningen av ett nytt labtest ge möjligheter både till effektiv kunskapsupbyggnad, genom att riggen erbjuder enklare styrning av kontaktparametrarna och är snabbare än motorcellsprovning, samt då med sin snabbhet och låga kostnad erbjuder möjligheter till snabba screening-tester av flera möjliga materialkandidater.

### 4. Genomförande

Scania CV AB, Ventilsystem vid avdelningen Motorutveckling och Basmotor vid avdelningen Materialteknik (Scania) har varit ansvarig för projektets utförande i samarbete med Tribomaterialgruppen, som är en underavdelning vid Institutionen för Ingenjörsvetenskaper vid Uppsala universitet (Uppsala).

Projektet har utförts i nära samarbete, genom en rad fysiska möten i Uppsala och i Södertälje, kompletterat med telefonmöten samt ett litet antal seminarier för en större grupp ingenjörer på Scania. Scania-gruppen har letts av Åsa Gustafson plus medarbetare

från den mest relevanta avdelningen inom konstruktion och provning, Petter Kylefors, Dominique Debord, Daniel Lindberg och Ivil Hanna.

Uppsalagruppen har haft en sammansättning bestående av en doktorand (Peter Forsberg), en senior forskare (Patrik Hollman) och tribomaterialgruppens ledare (professor Staffan Jacobson).

Forskningsmässigt har Uppsala stått för mikroskopiundersökningarna, ytanalys, konstruktion och intrimning av provrigg, framtagning av provmetodik, samt körningar i provriggen. Uppsala har vidare, i samråd med Scania, ansvarat för publikationer och presentationer vid öppna seminarier och konferenser.

Scania har först stått för att sätta in Uppsala i ventilsystemens komplexa värld och gett en förståelse för dagens och framtidens krav och begränsningar. Vidare har Scania bland annat stått för framtagning av ”verkliga” nötta ventiler från fältprovningar och motorcellkörningar vid Scanias teknikcentrum, framtagning av ventiler och säten för körningar i Uppsalas rigg, framtagning av de data av ventilsystemens detaljerade geometri, framställning och sammansättning som krävts för analys av provningen.

Alla resultat från motorcellskörningar, fält och rigg har diskuterats mellan parterna.

## 5. Resultat

### 5.1 Bidrag till FFI-mål

Enkelt uttryckt kan man säga att detta projekt bidrar till i stort sett alla FFI's mål (Enligt den följande listan). Några extra ord kan vara på sin plats om ett par punkter: Vår strävan att skapa en förbättrad kunskapsplattform inom området för nötningsmekanismer för ventilsystemet kommer att bidra till ett mer systematiskt tillvägagångssätt för framtida utvecklingsarbete och till en starkare ställning för Scanias R&D mot internationella leverantörer.

Samarbetet med Uppsala universitet kommer att stärka motorfokuset inom Sveriges materialforskning och kommer därför att ge en ökad internationell konkurrenskraft samt öppna för framtida samarbetsprojekt på andra områden, då parterna får en bättre kunskap om varandras kompetens och behov. Detta samarbete med universitetsvärlden kommer att få ökad betydelse i framtiden för att skapa ett mer vetenskapligt sätt hitta lösningar på kritiska tekniska barriärer. Eftersom utvecklingstiden för nya lösningar krymper, ökar behovet av samarbete, akademisk forskning och kunskap som kan stärka industrins kompetens och underlätta utveckling.

Som framgår av de följande avsnitten har projektet på olika sätt bidragit till att uppfylla följande punkter

- medverkat till en fortsatt konkurrenskraftig fordonsindustri i Sverige
- möjliggjort industriellt relevanta utvecklingsåtgärder
- lett till industriell teknik- och kompetensutveckling
- bidragit till stärkt FoU-verksamhet
- medverkat till att konkreta produktionsförbättringar hos Scania
- stött forsknings- och innovationsmiljöer
- verkat för att ny kunskap tas fram och implementeras,
- stärktsamverkan mellan fordonsindustrin och universitet,

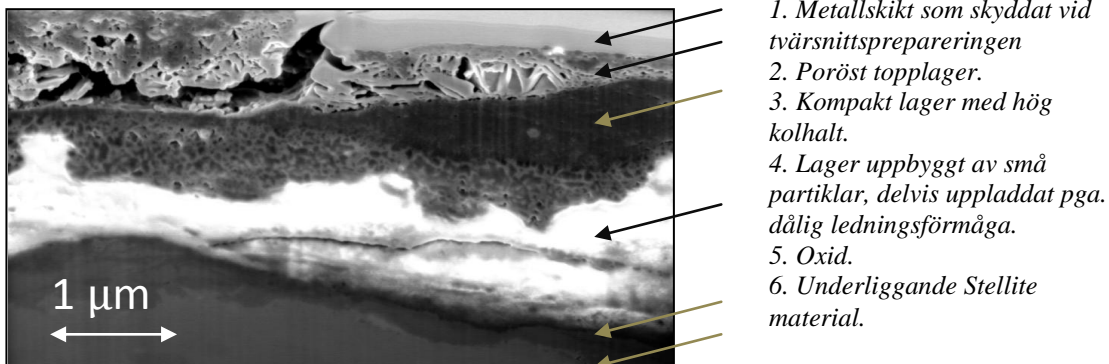
- verkat för att den nationella kompetensförsörjningen tryggas samt att FoU med internationell konkurrenskraft etableras

## 5.2 Konkreta resultat

Arbetet har varit framgångsrikt, och levererat ökad kunskap om området och användbara och lovande resultat. Ventiler och säten hämtade från fält och motorcellsprovning har undersökts i detalj, främst med avseende på de tribofilmer som bildats, och de skillnader man kan konstatera mellan olika bränsletyper. Vidare har en provningsrigg konstruerats, trimmats in och levererat mängder av intressanta resultat. Den största fördelen med denna rigg jämfört med den etablerade motorcellsprovningen är att den är snabb och billig, medger fler typer av studier och mer välkontrollerade förhållanden.

### *Kartläggning av nötning och tribofilmuppbyggnad på motorkörda ventiler*

Genomgående för de ventilsystem som undersökts, har det visat sig att de system som visar låg nötning har en skyddande tribofilm på tätningsytorna. Denna består ofta flera olika lager med skiftande struktur och sammansättning, se Figur 2. Gemensamt för lager 2, 3 och 4 är att de innehåller halter av bland annat kalcium och zink vilka troligtvis härstammar från additiv i olja eller bränsle.



*Figur 1. Typiskt tvärsnitt genom ventil från fordonstest. Lager 2-5 har byggts upp under pågående drift och utgör tribofilmen i detta fall.*

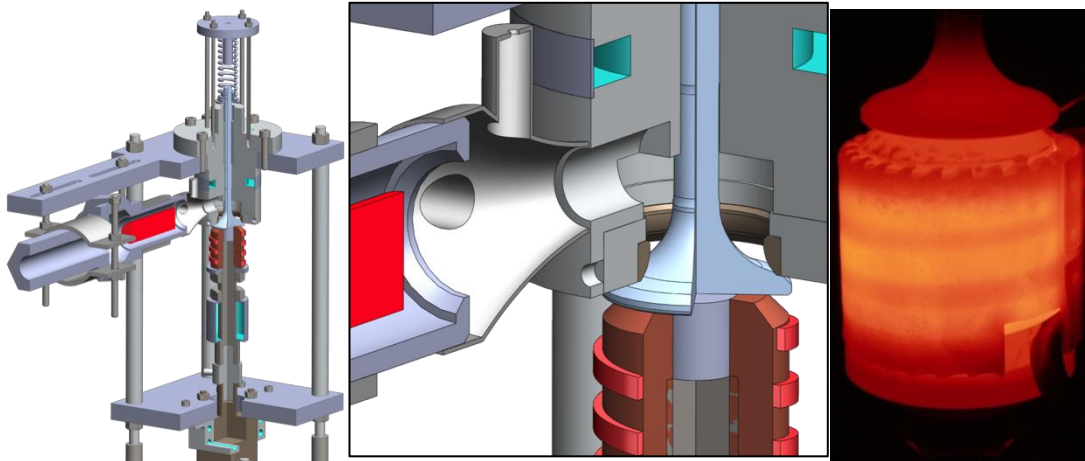
I flera fall där vi funnit tribofilm på ytorna, har den underliggande ytan varit helt orörd, medan det finns fall, som i figuren, där det underliggande ventilmaterialet även har en oxidfilm och en ojämn struktur. Detta tyder på att tribofilmen inte är konstant närvarande, utan att den snarare bildas, nöts av, nybildas etc. Detta gör det väldigt komplext att jämföra olika system, ofta med relativt okända körcykler [6, 8].

Dessa mekanismer är mycket intressanta och till stora delar tidigare okända. Kunskapen om vilka parametrar som är gynnsamma och vilka som är destruktiva för uppbyggandet och bevarandet av en skyddande tribofilm är fortfarande ofullständig, men ökar gradvis med det ökande antalet tester i testriggen.

### *Den nya ventiltestriggen*

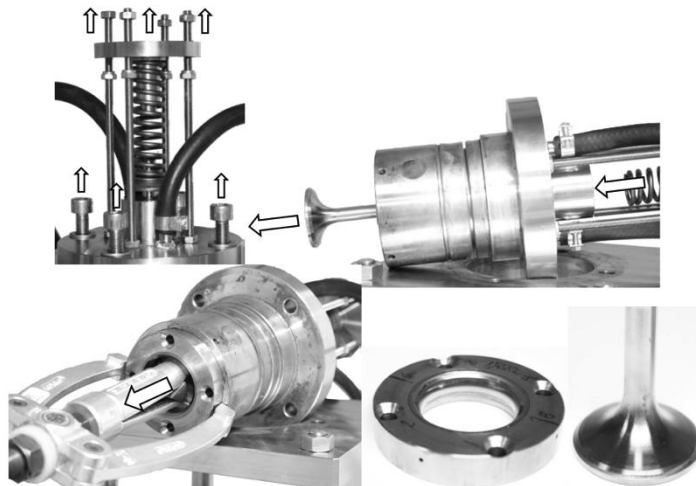
En testutrustning har utvecklats under projektet och är nu fullt operationell, se Figur 2. I riggen kan ventiler på ett enkelt sätt testas mot ventilsäten. En hydraulisk cylinder ger

ventilrörelsen och lägger på tryck som motsvarar förbränningstrycket i cylindern. En resistiv värmare värmer ventilen underifrån och förvärmad luft flödar igenom ventilen när den är öppen. I den förvärmda luften finns det även möjlighet att införa förvärmad olja som förångas när den förs in. Detta möjliggör att vi kan variera ett antal parametrar som inte kan separeras i motorcellstester.



Figur 2. Ventiltestriggen som designats, konstruerats och tagits i bruk inom projektet. Vänster bild visar en översikt över de centrala delarna med ventil och ventilsäte inramade och visade i högre förstoring i mitten. Högra bilden visar den kombinerade påtryckaren och uppvärmaren samt den upphettade ventilen under drift.

En annan avgörande fördel är att test kan avbrytas, delarna demonteras, ytorna utvärderas, delarna monteras, och testet kan sedan återupptas. Något motsvarande är inte möjligt i motorcellsprovning. I riggtestet kan denna utvärdering av nötning och ytstrukturer utföras vid valfria intervall. När maskinen stannat krävs endast ett par relativt enkla steg för att demontera ventil och sätesållare, se Figur 3.



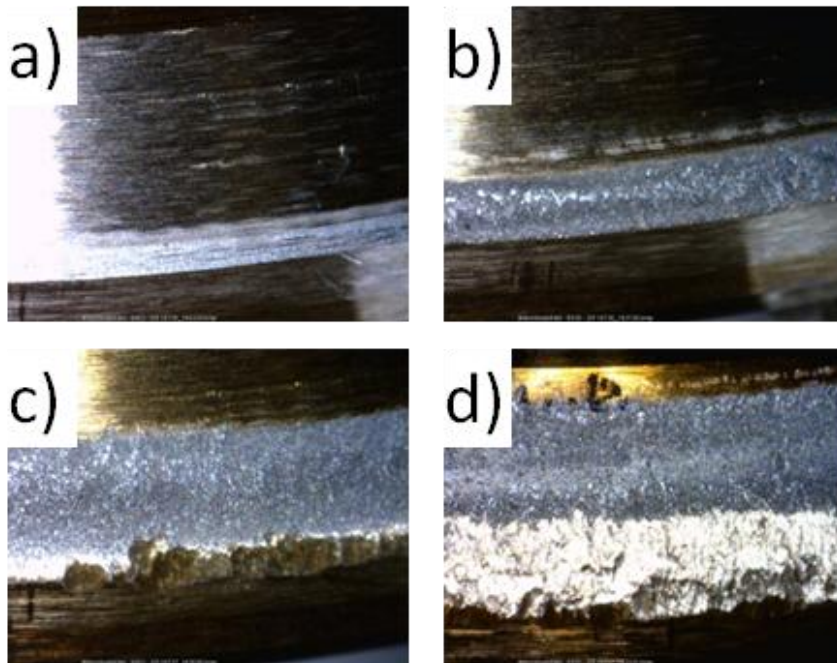
Figur 3. Demontering av ventil och sätesring i några enkla steg.

Genom att vid varje tillfälle ta bilder på ett flertal fasta positioner på både sätet och ventilen skapas en bra bild över det initiala nötningförloppet. Ett komplett test inklusive redigering och sammanställning av nötningbilderna klaras av under en dag. Detta

kontrasterar starkt mot motorcellstester som i regel körs över 400 timmar (och ofta över 1000 timmar) plus förberedelser, och inte lämpar sig för upprepade avbrott för att studera gradvisa förändringar. Ett motortest är också mycket kostsamt jämfört med ett test i riggen.

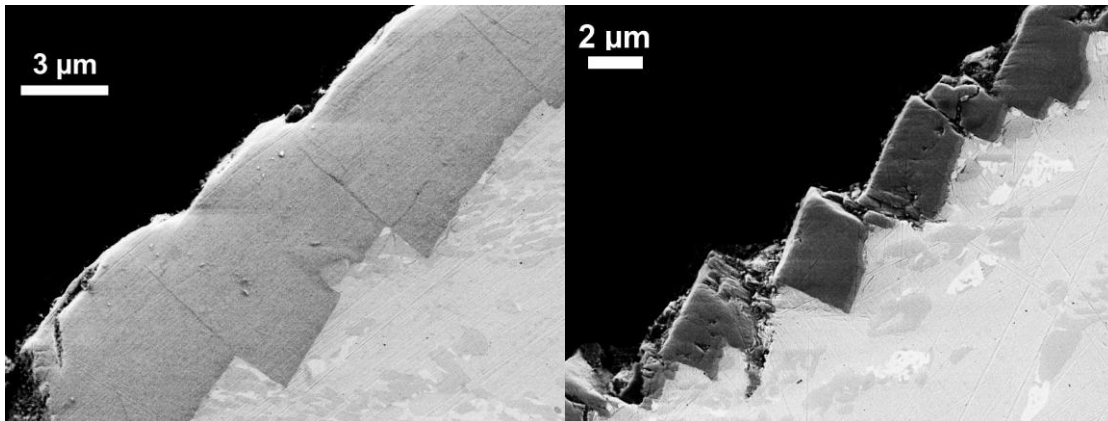
#### *Resultat från nya ventiltestriggen*

Efter den inledande intrimningen av riggen, har flera skarpa testserier utförts. Den första innefattade ett antal olika ytbeläggningar på ventiler, och kördes i en ren luftatmosfär utan oljedimma. Figur 4 visar exempel på nötningsutvecklingen hos en obelagd referensventil. Notera avflagnings av yttre kanten pga. utmattning i c) och d). Vissa av beläggningarna uppvisade bättre egenskaper än andra. Tyvärr visade sig det valda ventilmaterialet vara allt för veckt vid testtemperaturen, för att ge tillräckligt stöd för de tunna ytbeläggningarna. Detta är ett intressant resultat i sig, men förhindrar starka slutsatser om beläggningarnas förmåga att förbättra nötningsituationen i det långa loppet, se Figur 5. De initiala nötningsvärdena pekar dock mot att PVD-skikten har en potential att förbättra systemet, om även substratmaterial och motyta optimeras. Testerna belyser tydligt vikten av att göra ett korrekt materialval vid beläggning av ventilsystemen.



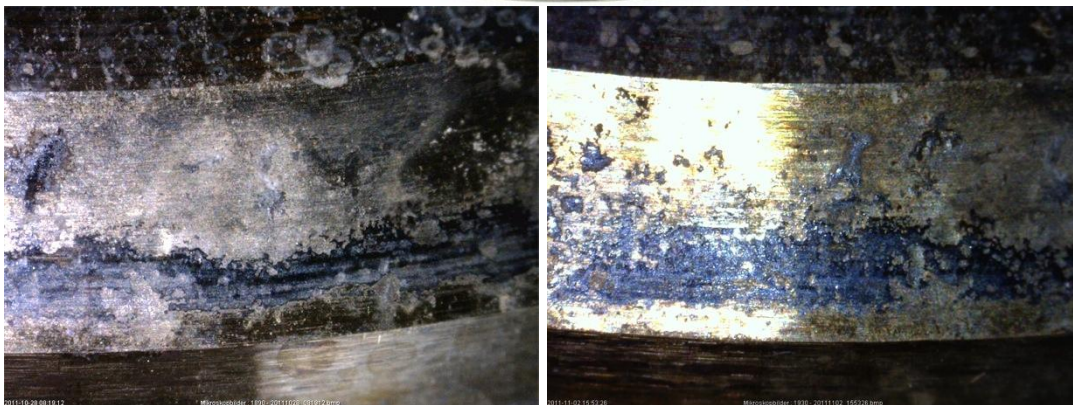
*Figur 4. Exempel på gradvis ökande nötning och slutligen avflagnings på ventilens kontaktyta, hämtat från torrt test i riggen. a) – d) visar läget efter 1 000, 8 000, 30 000 respektive 100 000 ventilyklar[7].*





Figur 5. Exempel på nedbrytningen av PVD-beläggningar på ventilerna. Beläggningarna har spruckit, vridits och tryckts ned i underlaget av kontaktkrafterna. Den främsta orsaken är att det underliggande materialet inte ger tillräckligt stöd (hårdhet) vid den höga arbetstemperaturen. Vänster CrN-skikt, höger TiAlN-skikt (Futura) [7].

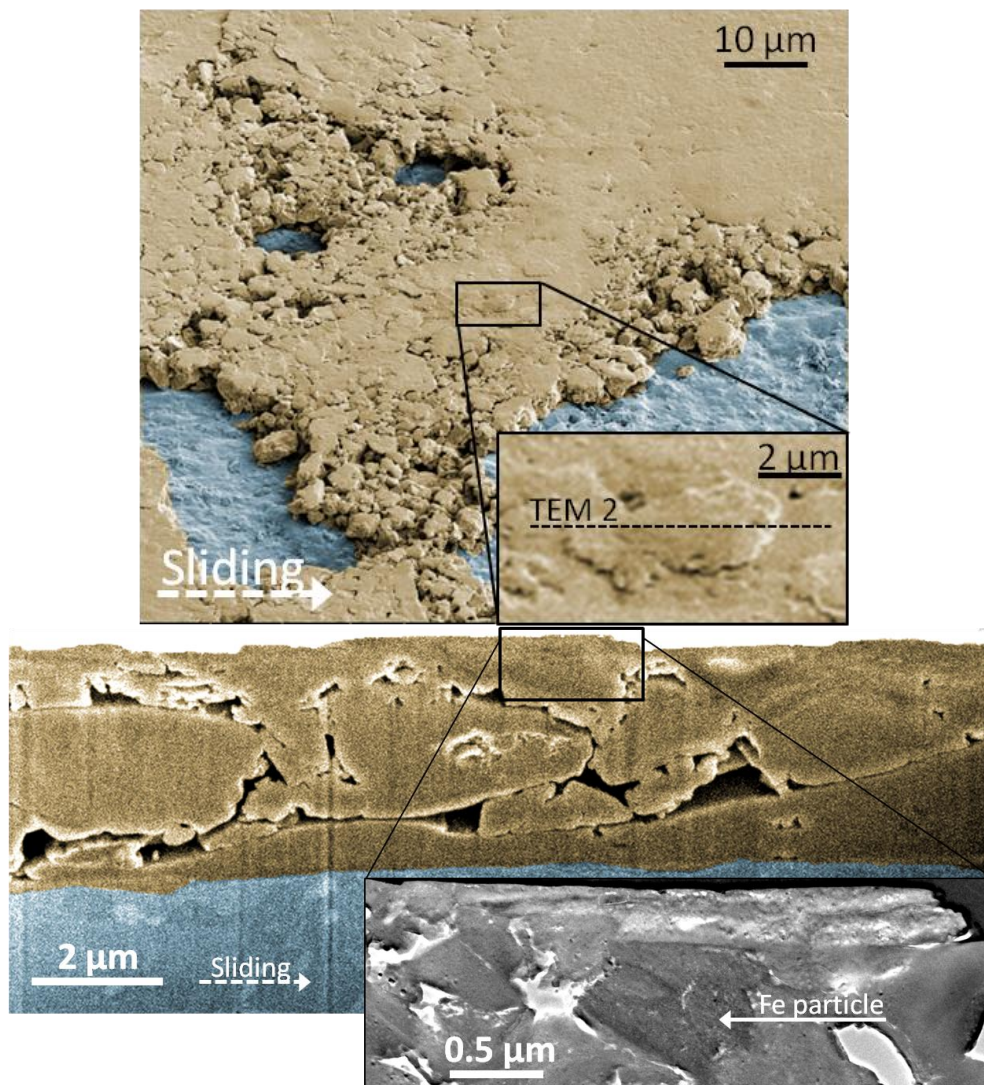
Testserier med inmatning av oljedimma har utförts med lyckat resultat, se exemplet i Figur 6. De tidiga resultaten visar att riggen kan bygga en tribofilm som är mycket lik dem som bildas i motorn, både vad gäller struktur och sammansättning. Detaljerad materialanalys av tribofilmerna tyder på att de byggs upp av agglomerat av nötningspartiklar tillsammans med oljan samt större oförbrända partiklar som landar på ytan och bildar en skyddande film.



Figur 6. Exempel på ventiler testad i riggen med flöde av oljedimma som resulterat i tribofilmuppbyggnad. Överst: översikt. Vänster: ventil körd 100 000 cykler (dvs lika länge som i Fig. 4d), Höger: ventil körd 500 000 cykler. Extremt låg nötning jämfört med ventiler körda i luft.

Testerna med oljedimma visade att den tribofilm som byggdes upp hade mycket skyddande egenskaper och reducerade nötningen till nära noll. Jämför bilderna från ett test där ventilen körts 500 000 cykler (nere till höger i Figur 6) med en körd 100 000 cykler i förhållanden där tribofilm inte bildas (Fig. 4) där nötningen var i närmaste noll.

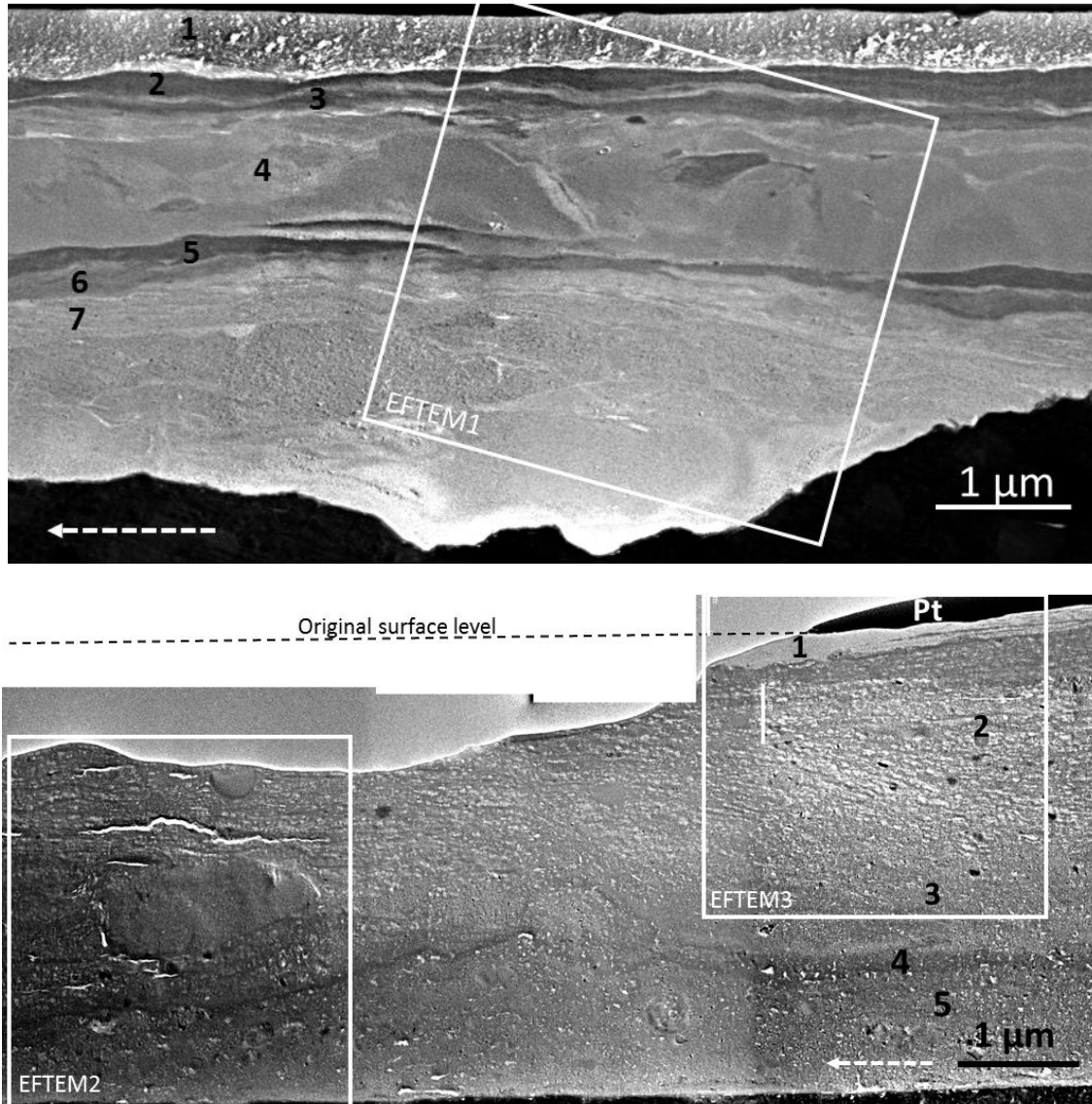
En grundlig analys (SEM, TEM, XPS, Nanointentation) av tribofilmer bildade i riggen och bildade på en ventil körd i fält, visade att de i båda fallen var mjukare än det underliggande materialet och i även övrigt visade många likheter. I kanterna av filmen kan man se spår av hur den byggts upp. Agglomerat av delvis förbrända/förångade rester från förbränningskammaren (till största del rester från motorolja) fastnar på ytorna och blir fastpressade. Nya partiklar tillkommer ovanpå och bygger med tiden upp en heltäckande film, se Fig. 7. Tribofilmen pressas och skjuvas med tiden ut till en helt tät film bestående av ett flertal olika lager.



Figur 7 Tribofilm på ventilytan uppbyggd av delvis förbrända oljepartiklar som klämts fast, och byggts samman till en delvis tät och skyddande film av ventiltrörelsen (slag plus mikroglidning).

a) SEM från ovanytan i kanten av tribofilm[6]. b) Tvärsnitt i SEM[6].

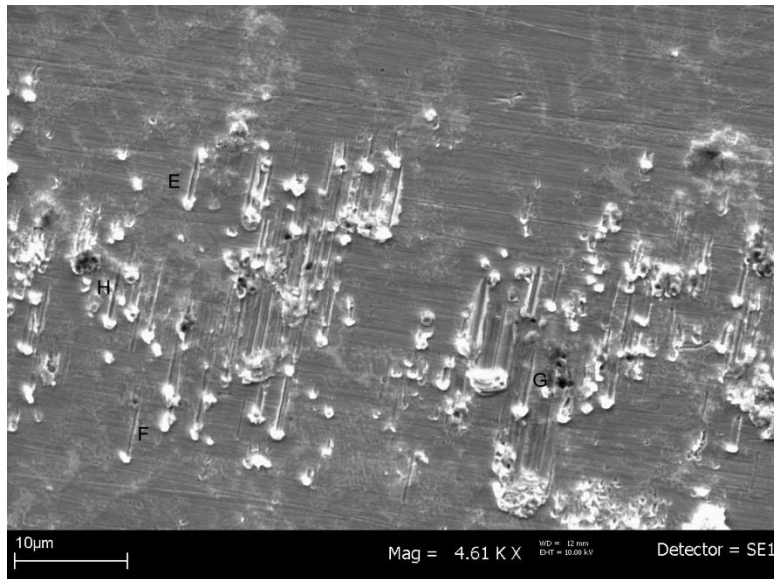
c) Transmissionselektronmikroskopbild som visar tribofilmens inre struktur i tvärsnitt [6]



Figur 8. TEM tvärsnitt som visar två täta och heltäckande tribofilmer där båda består av ett flertal lager samt större och mindre inbakade partiklar. Övre från riggventil och undre från fält [6].

### Experimentell teknik för att påvisa och mäta mikroglidningen vid ventilstängning

De unika styrningsmöjligheterna hos ventilstestrigen har gjort det möjligt att ta fram helt unik experimentell kunskap om den relativa rörelsen mellan ventilytorna under ventilstängningen. Det är sedan länge känt att det måste uppstå viss glidning mellan ytorna under det att ventilen stängs; det är alltså inte en ren slagrörelse. Rörelsen uppkommer på grund av att främst ventilen deformeras – flexar – en aning, av den stigande lasten. Det har dock inte funnits möjligheter att mäta denna rörelse, utan man har fått förlita sig på relativt osäkra FEM-uppskattningar. I riggen har dock ett listigt test utförts, som visat att dessa uppskattningar stämmer väl, se Figur 8. Denna kunskap tillåter att man med ny säkerhet kan diskutera hur nötningen går till, nu när glidsträckan är känd.



Figur 9. Sätesyten på en ventil efter test av mikroglidningen vid ventilstängning. Diamantpartiklar har först fördelats över ytan. Därefter har ventiltriggen körts endast ett enda slag. På ytorna har då repor uppkommit vars längd motsvarar den lokala glidsträckan, i detta fall ca 5-10  $\mu\text{m}$

## 6. Spridning och publicering

### 6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Resultaten och den uppbyggda kunskapen har naturligtvis i första hand spritts inom projektet, men projektets karaktär har även gjort det möjligt att sprida kunskapen mycket öppet, vid konferenser, work shops, seminarier och även som intressanta tillämpade exempel vid civilingenjörsundervisningen i Uppsala och nationella forskarskolekurser i tribologi.

Projektets aktualitet och allmängiltighet vad gäller *miljö- och energidrivna teknisk utveckling* har gjort att det funnits ett stort intresse att höra om det vid seminarier och konferenser, även utanför den relativt snäva krets som intresserar sig just för ventilmekanismernas tribologi. För tribomaterialgruppen i Uppsala har projektet varit mycket betydelsefullt och centralt i den aktuella ”projektportföljen” som innefattar fler projekt med snarlik bakgrund. Ett exempel är Europaprojektet Helios, inriktat mot teknikutveckling som skulle kunna tillåta en konvertering av dagens fartygsdieselmotorer från drift med dagens högsvavelhaltig HFO (heavy fuel oil), till helt svavelfri naturgas. Uppsalas del i det stora projektet innebär studier av förändringarna i nötningsmekanismer när de skyddande svavelhaltiga tribofilmerna inte längre byggs upp på cylinderfoder och kolringar, och vilka materialförändringar som skulle kunna kompensera den aggressivare nötningen. Dessa båda projekt (och även fler relaterade projekt i Uppsala) berikar naturligtvis varandra.

Förutom vid reguljära projektinterna möten och presentationer har projektet och delar av resultaten presenterats vid *Ångströms tribomaterialdagar* 8-9 september 2010 i Uppsala, vid *Danish-Swedish Tribology Days* 17-18 november 2010 i Köpenhamn, vid

*International Conference of Wear of Materials*, Philadelphia 4–7 april 2011, *Ångströms tribomaterialdagar* 14-15 juni 2011, *Skandinaviska tribologidagarna*, 8-10 november 2011 i Trollhättan, *SAE 2012 World Congress & Exhibition*, Detroit, 24-26 april 2012 samt vid *Ångströms tribomaterialdagar* 22-23 maj 2012 i Uppsala.

*Nationella och skandinaviska work shops and seminarier (skriftlig dokumentation i form av powerpoint hand-outs)*

1. Peter Forsberg, Nötningsmekanismer hos avgasventilsystem i moderna lastbilmotorer, Ångströms tribomaterialdagar, 2010
2. Peter Forsberg, Wear mechanisms of exhaust valve systems on modern truck engines, Danish-Swedish Tribology Days 2010 i Köpenhamn
3. Peter Forsberg; Avgasventilnötning - En djupdykning i mekanismerna bakom de extrema nötningsskillnader som kan uppstå mellan olika cylindrar i samma motor, Ångströms tribomaterialdagar, Uppsala, 2011
4. Forsberg, P., P. Hollman, and S. Jacobson, Wear simulation and evaluation of heavy duty exhaust valve systems in a test rig, Skandinaviska tribologidagarna, 2011 i Trollhättan
5. Peter Forsberg; Skyddande tribofilmer från föroreningspartiklar? En ventilriggsundersökning om konsekvenser av renare avgaser, Ångströms tribomaterialdagar, Uppsala, 2012

## 6.2 Publikationer

Projektets resultat har publicerats i vetenskapliga och tekniska tidskrifter. I flera fall har samma material först presenterats muntligen vid konferenser (och skriftligen i konferensens proceedings) och sedan blivit accepterat för publikation i tidskrifter. Peter Forsberg planerar presentera sin avhandling inom detta projekt september 2013, främst baserat på nedanstående artiklar och ytterligare tre som är under arbete.

### *Journal papers*

6. Forsberg, P., F. Gustavsson, P. Hollman, and S. Jacobson, "Comparison and analysis of protective tribofilms found on heavy duty exhaust valves from field service and made in a test rig", *Wear* (2013): accepted for publication.
7. Forsberg, P., P. Hollman, and S. Jacobson, "Wear Study of Coated Heavy Duty Exhaust Valve Systems in a Experimental Test Rig". SAE Technical Paper 2012-01-0546 (2012)
8. Forsberg, P., P. Hollman, and S. Jacobson, "Wear mechanism study of exhaust valve system in modern heavy duty combustion engines". *Wear* 271, no. 9-10 (2011): 2477-84.

### *International conference papers and posters*

9. Forsberg, P., F. Gustavsson, P. Hollman, and S. Jacobson. "Comparison and analysis of protective tribofilms found on heavy duty exhaust valves from field service and made in a test rig", *Wear of Materials*. Portland, USA, 2013.
10. Gustavsson, F., V. Renman, P. Forsberg, A. Hieke, and S. Jacobson. "Smart DLC Top Coating for Reduction of Counter Surface Wear in Fuel Contact." Paper presented at Tribology, Faraday Discussion 156, Southampton, U.K., 2012.
11. Forsberg, P., P. Hollman, and S. Jacobson. "Wear Study of Coated Heavy Duty Exhaust Valve Systems in a Experimental Test Rig." In *SAE 2012 World Congress & Exhibition*, 2012.
12. Forsberg, P., P. Hollman, and S. Jacobson, "Heavy duty exhaust valve simulation and evaluation in a test rig", Presented at Nordtrib, Trondheim, Norway, 2012.

13. Forsberg, P., P. Hollman, and S. Jacobson. "Protective tribofilm build up from exhaust residues on the surface on exhaust valve systems in a test rig." In Nordtrib, Trondheim, Norway, 2012.
14. Forsberg, P., and S. Jacobson, "On the formation of a protective tribofilm build up from the exhaust residues on the sealing surface on heavy duty exhaust valve systems in a test rig", Presented at Nordtrib, Trondheim, Norway, 2012.

## 7. Slutsatser och fortsatt forskning

- Samarbetet mellan de involverade personerna på Scania CV och vid Uppsala universitet är nu väletablerat och effektivt.
- En fungerande rigg har designats med hjälp av båda parternas expertis, och mycket snabbt nått en nivå där intressanta undersökningar kan genomföras. En tydlig indikator på riggens fördelar är att Scania nu bygger en till, för bruk inom Scania, finansierad utom FFI-projektet.
- De höga kraven som måste ställas på de underliggande ventilmaterialen för att moderna keramiska PVD-skikt ska kunna användas har tydligt demonstrerats.
- Tribofilmernas kraftigt skyddande verkan tydligt demonstrerad. Kontakten blir extremt aggressiv och nötande, i frånvaro av de filmbildande elementen.
- Analysen av tribofilmerna gör att vi nu förstår mycket mer om hur de uppkommer och vilka komponenter som är viktigast.
- Mängder med ny kunskap och metodik genererad hos båda parter som kommer att kunna användas i framtida forsknings- och utvecklingsprojekt
- Projektet har varit mycket utvecklande för doktoranden, då det involverat mångsidig forskning, gett breda kunskaper och erfarenhet av relevant industriell utveckling.

### Fortsatt forskning

Projektets framgångsrika koncept ledde till en ansökan om förlängning och viss utvidgning av projektet. Parterna kände relativt tidigt att det första projektet är var allt för kort för att alla goda frukter skulle hinna skördas. Området är mycket komplext och de grundläggande kunskaperna har varit begränsade (inte bara inom projektet, utan även sett till *state of the art* i forskningslitteraturen). Ansökan accepterades av FFI och det projekt som här avrapporteras har nu utan skarv övergått i det nya.

Det kan konstateras att området blir allt viktigare. Utvecklingsarbetet för kommande emissionslagstiftning Euro 7 har inletts och kraven är ytterligare åtstramade. Kraven på frihet från partiklar och förbrännings sot samt låga kväveoxidhalter blir extrema och troligtvis kommer även begränsning av koldioxidutsläpp. Kraven på att motorerna ska behålla sina låga emissioner även efter lång tids användning skärps ytterligare.

Det handlar även om att ha handlingsberedskap när förutsättningarna ändras, inte bara för nya motorer, utan även när den installerade basen av 1 000 000-tals motorer börjar användas med nya bränslen och bränsleblandningar, allt beroende på marknaden. Olika bränsletyper kommer att öka allteftersom delar av transportsektorn kommer att ställa om från fossila bränslen till biobränslen. Projektet breddas därför till att innefatta inte bara

avgassidan (som den just avslutade etappen), utan även inloppsventiler och inloppssäten. Avgassidan spelar framförallt en roll för hur effektivt motorn använder bränslet genom att minimera gasväxlingsförluster. Inloppssidan däremot spelar en direkt avgörande roll för att styra inloppsluftströmmarna för optimal förbränning, dvs. maximal verkningsgrad och minimal sotbildning. För kommande emissionslagstiftningar kommer även kraven på mycket låg slitagehastighet på inloppsventiler att öka. Dessvärre resulterar ventil- och sätesdesigner optimerad mot optimal förbränning i dåliga slitageegenskaper. Här krävs alltså nya verktyg. Förbättrade kunskaper om optimering av ytor, och valet av kombinationer av material och skiktbeläggningar i ventilkontaktarna, kan erbjuda dessa verktyg. Då inloppssidan håller en lägre temperatur i än den studerade avgassidan så kommer ombyggnationerna av riggen som krävs att vara minimala. Doktoranden Peter Forsberg kommer att disputeras i september. En ny doktorand kommer att antas i februari och arbeta parallellt med Peter, för att sedan ta över projektet i höst. Specifika studier som är planerade under Peters återstående tid i projektet:

- Typen av motorolja och även mängden som förbrukas varierar mellan motortyper och olika delar av världsmarknaden. En specifik studie av detta inverkar på uppbyggnaden av den skyddande tribofilmen kommer att utföras i riggen.
- Undersökning och ytanalys av inloppsventiler med representativa nötningsfall (hög/låg/etc.) från fält- och motorcellstester.
- När uppbyggnaden av tribofilmerna är förstådd (dvs. vid vilka parametrar filmen lättast byggs upp) så kan en studie av nedbrytningsmekanismer inledas.

En djupare förståelse för vad som bygger upp respektive bryter ner den skyddande tribofilmen kan användas som fingervisning om vilka sorts driftlägen och situationer som kan vara att föredra i framtida motorer för att skydda mot ventilslitage.

## 8. Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektet har utförts av Scania CV AB och Uppsala universitet, avdelningen för Tillämpad materialvetenskap.

Kontaktpersoner:

Scania CV: Åsa Gustafson (projektledare) [asa.gustafson@scania.com](mailto:asa.gustafson@scania.com), 08-553 82909

Uppsala universitet: Professor Staffan Jacobson, [staffan.jacobson@angstrom.uu.se](mailto:staffan.jacobson@angstrom.uu.se), 018-471 30 80



UPPSALA  
UNIVERSITET