

FFI

FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

Förbättrade prestanda hos bromsskivor



Författare: Peter Skoglund
Datum: 2013-06-20
Delprogram: Fordonsutveckling

Innehåll

1. Sammanfattning	3
2. Bakgrund	4
3. Syfte.....	6
4. Genomförande.....	6
5. Resultat	7
5.1 Bidrag till FFI-mål	12
6. Spridning och publicering.....	12
6.1 Kunskaps- och resultatspridning	12
6.2 Publikationer	13
7. Slutsatser och fortsatt forskning.....	14
8. Deltagande parter och kontaktpersoner	14

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings-, innovations- och utvecklingsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Säkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör hälften.

För närvarande finns fem delprogram Energi & miljö, Fordons- och trafiksäkerhet, Fordonsutveckling, Hållbar produktionsteknik och Transporteffektivitet. Läs mer på www.vinnova.se/ffi

1. Sammanfattning

FFI-projektet "Förbättrade prestanda hos bromsskivor, Dnr. 2009-01449" är ett samarbete mellan Scania och Institutionen för tillämpad mekanik vid Chalmers tekniska högskola. Syftet med projektet är att utveckla en bromsskiva med bättre totalprestanda och att få en bättre förståelse för de processer som styr livslängden hos bromsskivor.

Projektet har bedrivits i nära samarbete mellan de två deltagande organisationerna. Från Chalmers har en doktorand, Gaël Le Gigan, arbetat med projektet under handledning av dr Tore Vernersson och professor Roger Lundén. På Scania bestod projektgruppen av medarbetare från avdelningarna för materialteknik, axelutveckling och bromsprestanda. Gruppen vid Chalmers har mycket god kännedom om termomekanisk belastning och provning av bromskomponenter för tåg genom forskning bedriven inom kompetenscentret CHARMEC (CHAlmers Railway MEChanics). I det här aktuella projektet har denna kunskap tillämpats på komponenter avsedda för tunga lastbilar. Gruppen vid Chalmers har utvecklat analysmetoder för de fullskaliga bromsdynamometerprov som genomförts vid Scania men har också utfört materialmodellering och FEM-beräkningar. Scania har bidragit med testgjutna bromsskivor med olika sammansättningar och även med termiska och mekaniska materialdata hos de undersökta legeringarna. Vidare har Scania undersökt egenskaper hos bromsbelägg.

Projektet har varit mycket framgångsrikt och bland annat genererat ny kunskap angående vilka materialparametrar som styr bromsskivors totalprestanda. Arbetet har också lett till ny kunskap om termomekanisk utmattnings och materialmodellering. Inom ramen för projektet har också förbättrade metoder för provning och utvärdering av bromsdynamometerförsök utvecklats. Slutligen har en ny legering lämplig för bromsskivor utvecklats och patenterats. Bromsskivor med denna sammansättning används för närvarande i ett stort fältprov på lastbilar över hela världen.

Arbetet har gett resultat som har publicerats på en konferens samt i flera rapporter och en licentiatuppsats kommer att presenteras under hösten 2013. Projektet har vidare lett till ett öppet och effektivt samarbete mellan de berörda avdelningarna på Scania och Chalmers. Arbetet har också visat att det krävs ytterligare ansträngningar för att förbättra de modeller som används för livslängdsberäkningar av gråjärn utsatta för komplexa termomekaniska belastningar. Ett fortsättningsprojekt har därför utarbetats och detta nya projekt godkändes av Vinnova i december 2013. Fortsättningsprojektet har rubriken "Improved performance of brake discs – Stage 2" Dnr. 2012-03662. Det nya projektet påbörjas i juli 2013 och avslutas i juni 2015. Projektet har fokus på materialmodellering och ska också leda till en doktorsexamen för doktoranden.

2. Bakgrund

Syftet med denna rapport är att sammanfatta några av de viktigaste slutsatserna i FFI-projektet "Förbättrad prestanda hos bromsskivor". Projektet är ett samarbete mellan Scania och Institutionen för tillämpad mekanik vid Chalmers tekniska högskola.

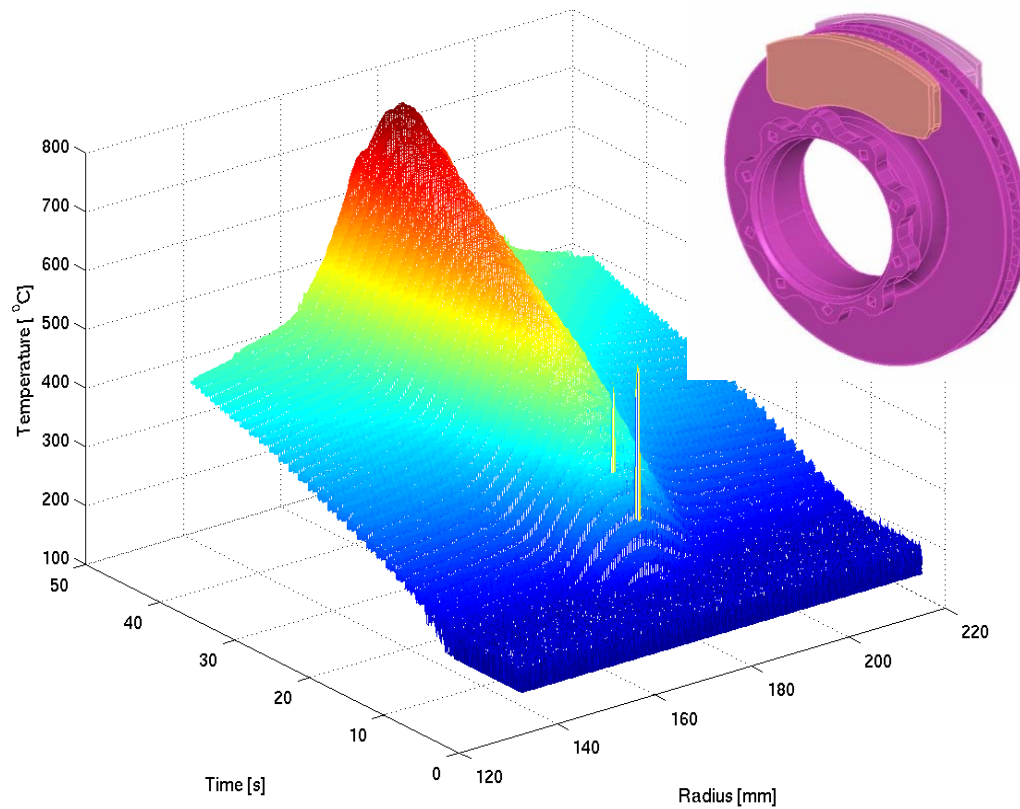
När ett fordons rörelseenergi omvandlas till värme i bromsskivan och bromsbeläggen utsätts dessa komponenter för höga termomekaniska belastningar. Det komplexa lastfallet resulterar i slitage av belägg och skiva men också till sprickor i skivan på grund av termomekanisk utmattning. Båda dessa fenomen kan leda till minskad bromsförmåga och säkerhetsproblem, men dessutom minskar nyttjandegraden hos fordonet då slitna komponenter måste ersättas. Detta arbete har initierats i syfte att förstå de mekanismer som bestämmer livslängden hos bromsskivorna och därmed kunna öka fordonets prestanda och minska antalet byten av bromsskivor.

Dagens bromsskivor för lastbilar är tillverkade av gråjärn och viktiga egenskaper inkluderar hög värmeledningsförmåga och bibehållna mekaniska egenskaper vid förhöjda temperaturer. Naturligtvis är det också viktigt att friktions- och nötningsegenskaperna är så bra som möjligt och det är då viktigt att notera att dessa egenskaper är direkt relaterade till den typ av belägg som används. Olika belastningar kan leda till olika typer av brottmekanismer och en skiva som uppfyller vissa krav kan vara sämre i andra avseenden. Beroende på var och hur lastbilen körs, kommer även belastningen på skivan att variera och det är därför väldigt svårt att optimera livslängden på bromsskivorna. I det aktuella projektet är fokus på att maximera skivornas livslängd med avseende på motstånd mot termisk sprickbildning men andra egenskaper, såsom friktion och nötning måste fortfarande vara bra. Av de två nämnda fenomenen nötning och sprickbildning är sprickbildning den dominerande orsaken till att skivor byts ut. Bromsskivors förmåga att motstå termomekanisk utmattning och sprickpropagering kan undersökas med hjälp av fullskaliga prov med en bromsdynamometer, se figur 1. I ett sådant, så kallat sprickprov, utsätts bromsskivan för en upprepad specifik bromscykel och spricktillväxten noteras som en funktion av antalet bromscyklar.



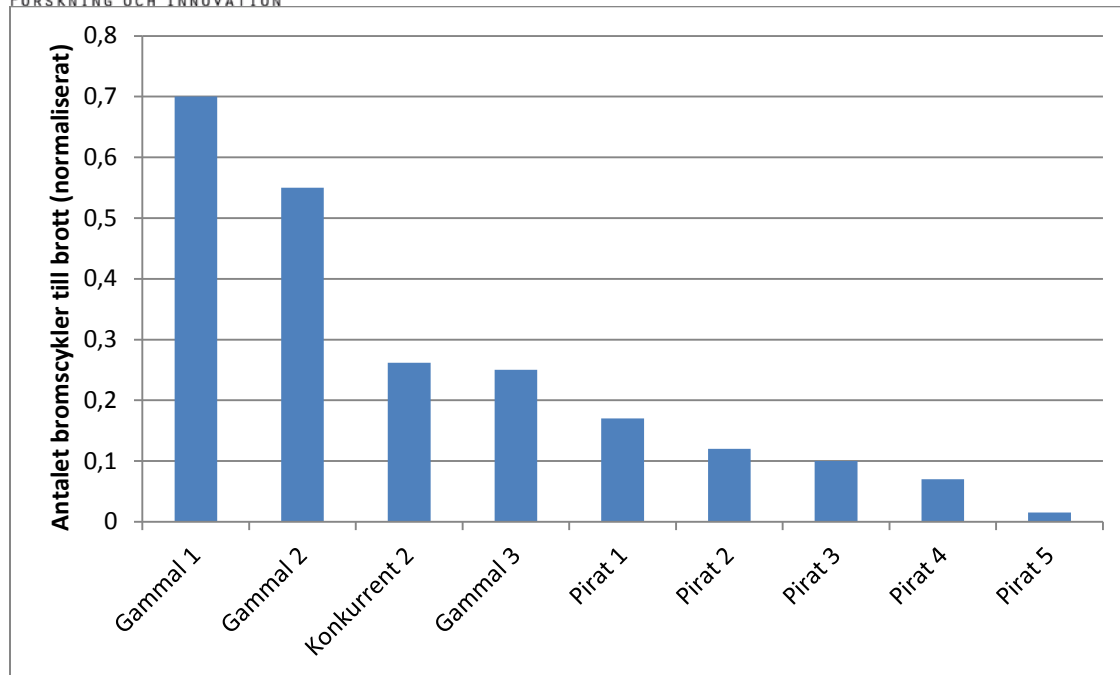
Figur 1. Till vänster ses en bromsskiva med kraftiga termiska sprickor och till höger ges en översiktsbild över en bromsdynamometer.

Under ett bromsdynamometerprov utsätts bromsskivan för höga temperaturer och i figur 2 ges ett exempel på hur temperaturen varierar under provet. Det framgår att temperaturen på bromsskivans yta är i närheten av 750 °C.



Figur 2. Exempel på temperaturutveckling på bromsskivans yta under ett så kallat sprickprov med bromsdynamometer.

Uppvärmningen av skivan under bromsning leder till tryckspänningar och plastiska deformationer och när skivan kyls ned uppstår dragspänningar. Upprepade bromsningar leder till sprickinitiering och spricktillväxt och slutligen kommer skivan att gå sönder på grund av termomekanisk utmattning. I figur 3 ges antalet broms cykler till brott för bromsskivor med samma geometri men gjutna i olika gråjärnslegeringar. Det framgår att det är mycket stora skillnader i livslängd och det är således viktigt att undersöka de mekanismer som styr bromsskivors livslängd.



Figur 3. Antalet bromscyklar till brott för bromsskivor gjutna av olika gråjärnslegeringar. Resultaten är normaliserade så att ett värde på 1 motsvarar en så kallad genomlöpare (dvs bromsskivan klarar hela det antal cykler som testet körs). Alla skivor har samma geometri och är provade mot samma typ av bromsbelägg.

3. Syfte

Projektets huvudsyfte har varit att öka kunskapen om de olika mekanismer som styr livslängden och prestandan hos bromsskivor för tunga lastbilar. Detta innebär utveckling av metoder för att rangordna potentiella material för bromsskivor med avseende på motståndskraft mot termisk sprickbildning och med avseende på nötnings- och friktionsegenskaper. Vidare har projektet förväntats generera kunskap som möjliggör att nya legeringar för bromsskivor med förbättrad prestanda kan utvecklas. Dessutom är det av största vikt att utveckla beräkningsmodeller och materialbeskrivningar som kan möjliggöra optimering av vikt och geometri hos bromsskivorna. På längre sikt förväntas projektet generera kunskap som kan användas för att avgöra om andra och lättare material än gråjärn kan användas för framtida skivbromssystem, där hybridteknik kommer att användas för regenerering av delar av bromsenergin.

4. Genomförande

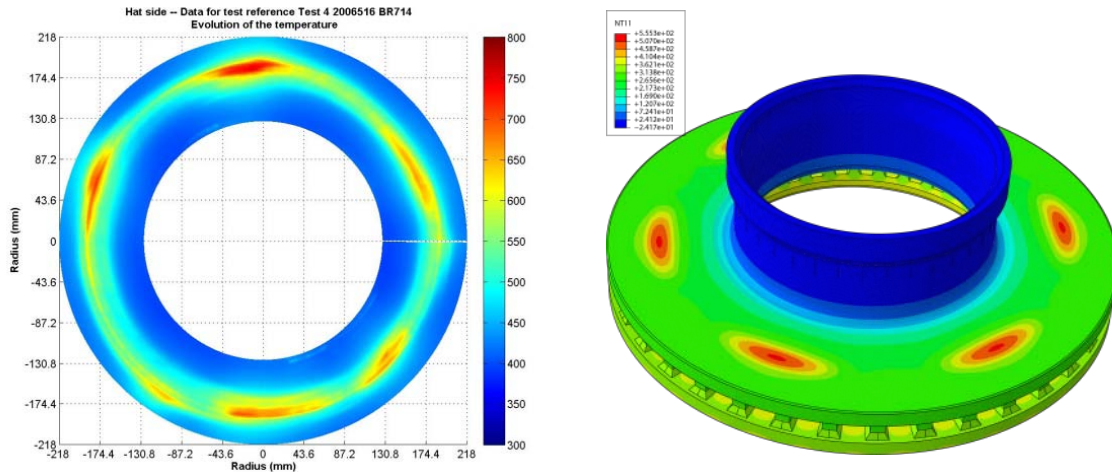
Projektet har drivits i nära samarbete mellan Scania och Institutionen för tillämpad mekanik vid Chalmers tekniska högskola. På Scania har avdelningarna för materialteknik, axelutveckling och bromsprestanda varit ansvariga för att genomföra

projektet. Gruppen på Chalmers bestod av en doktoranden Gaël Le Gigan och hans handledare dr. Tore Vernersson och professor Roger Lundén. Vid Chalmers finns en djup kunskap om termomekanisk belastning och provning av bromskomponenter genom forskning som bedrivits inom kompetenscentret CHARMEC (CHAlmers Railway MEchanics). I det här aktuella projektet har denna kunskap tillämpats på komponenter avsedda för tunga lastbilar. Gruppen vid Chalmers har utvecklat analysmetoder för de fullskaliga bromsdynamometerprov som genomförts vid Scania men har också utfört materialmodellering och FEM-beräkningar. Scania har bidragit med testgjutna bromsskivor med olika sammansättningar och även med termiska och mekaniska materialdata hos de undersökta legeringarna. Vidare har Scania undersökt egenskaper hos bromsbelägg.

Resultaten från riggtesterna, materialprovningen och finita elementberäkningarna har diskuterats i en rad fysiska arbetsmöten på Scania och Chalmers kompletterade med telefonmöten. En styrgrupp med representanter från Scania och Chalmers följde och kontrollerade projektarbetet och dess tidsplan.

5. Resultat

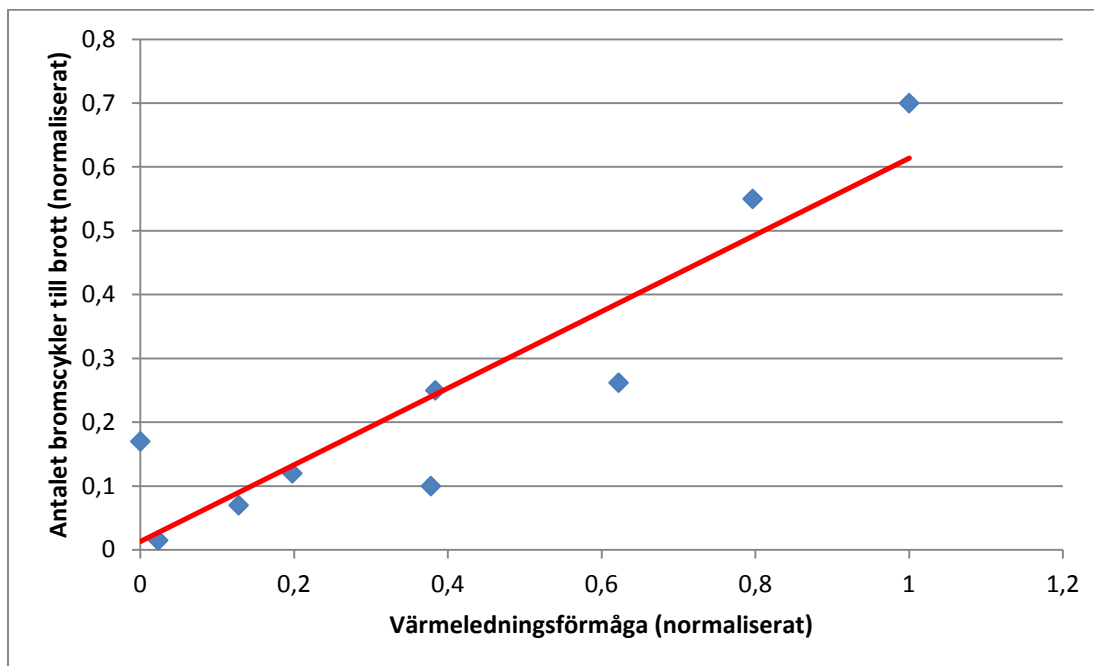
Det måste betonas att projektet har varit mycket framgångsrikt och bidragit både till de allmänna målen i FFI-programmet men också till de mer specifika målen för projektet och nedan beskrivs några av de mest intressanta resultaten. Det har tidigare nämnts att en bromsskivas prestanda kan undersökas genom att använda en bromsdynamometer. I detta projekt har instrumenteringen av bromsskiva och bromsbelägg förbättrats och nya mera automatiserade utvärderingsmetoder utarbetats. I den vänstra delen av figur 4 ses ett exempel på den uppmätta värmefördelningen på bromsskivan i slutet av en bromsryckning i ett sprickprov. Det är tydligt att värmen i detta fall är lokaliserad till så kallade "hot spots". Detta innebär att det är nödvändigt att ha kunskap om den lokala värmefördelning i skivan. Resultat av denna typ kan användas för att kalibrera finita elementberäkningar, se den högra delen av figur 4.



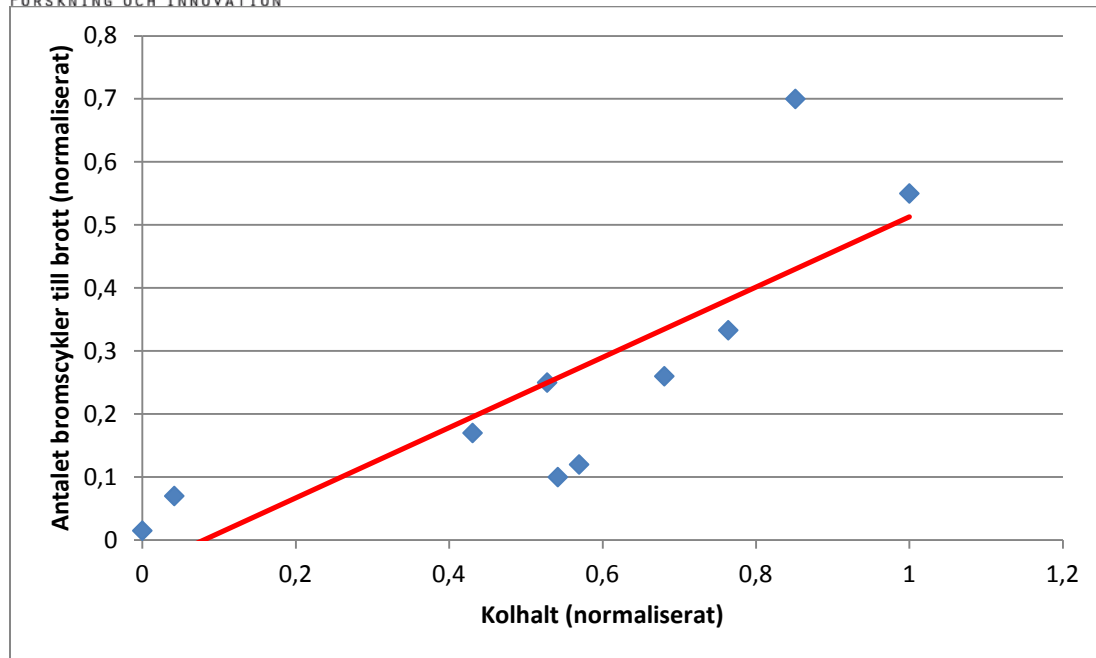
Figur 4. Uppmätta (vänster) och beräknade (höger) temperaturer på ytan av en bromsskiva i slutet av en bromscykel.

Materialegenskaper

Undersökningarna visar tydligt att en av de viktigaste materialegenskaperna för bromsskivor av gråjärn är värmeledningsförmågan. En hög värmeledningsförmåga reducerar de termiska spänningarna och därmed spricktillväxten. En hög värmeledningsförmåga fås om kolhalten är hög vilket ger en stor andel grafit som leder värme bra. I figur 5 och 6 ges den normaliserade livslängden som funktion av värmeledningsförmågan (figur 5) och kolhalten (figur 6).



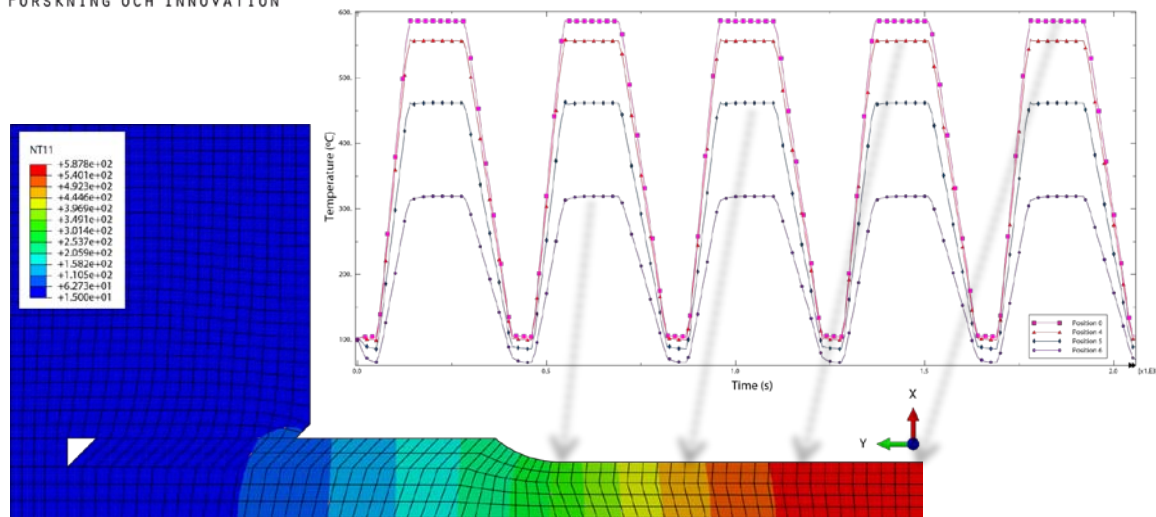
Figur 5. Antalet bromscyklar (normaliserade så att ett värde på 1 motsvarar en genomlöpare) till brott som funktion av värmeledningsförmågan normaliserad mellan det högsta och lägsta undersökta värdet.



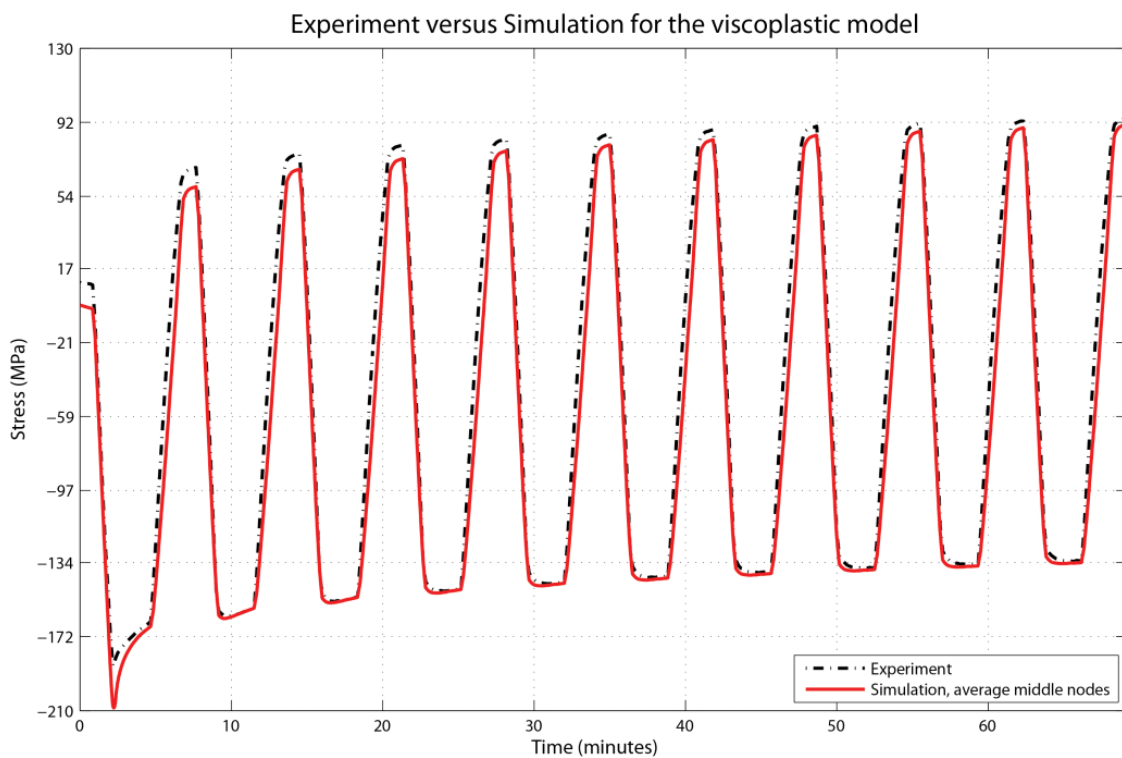
Figur 6. Antalet broms cykler (normaliserade så att ett värde på 1 motsvarar en genomlöpare) till brott som funktion av kolhalten normaliserad mellan det högsta och lägsta undersökta värdet.

Materialmodellering

Ett viktigt syfte med arbetet har varit att utveckla materialmodeller som kan användas för att förutsäga livslängd och prestanda för nya och lättare bromsskivor med annan och förbättrad geometri. Dessa beräkningar kan också vara användbara för att göra prognoser för hur långa serviceintervallen ska vara på bromssystemet. Ett första steg för att utveckla dessa modeller är att utsätta en provstav för upprepad uppvärmning och avkyllning på ett sådant sätt att det motsvarar den belastning som kan uppstå under bromsning. I figur 7 jämförs den uppmätta temperaturprofilen med den beräknade på en provstav då den värms och kyls. Vidare är i detta experiment provet fast inspänt, dvs. dess expansion vid uppvärmning är förhindrad vilket istället resulterar i att provet utsätts för en kraft som mäts. I figur 8 jämförs den uppmätta resulterande cykliska tryck- och dragspänningen med den spänning som beräknats med hjälp av den framtagna materialmodellen.



Figur 7. Den övre delen av grafen visar den uppmätta temperaturen på några olika punkter längs ett fast inspänt prov under upprepad uppvärmning och avkylning. Den undre delen av figuren visar den beräknade temperaturen på motsvarande punkter.



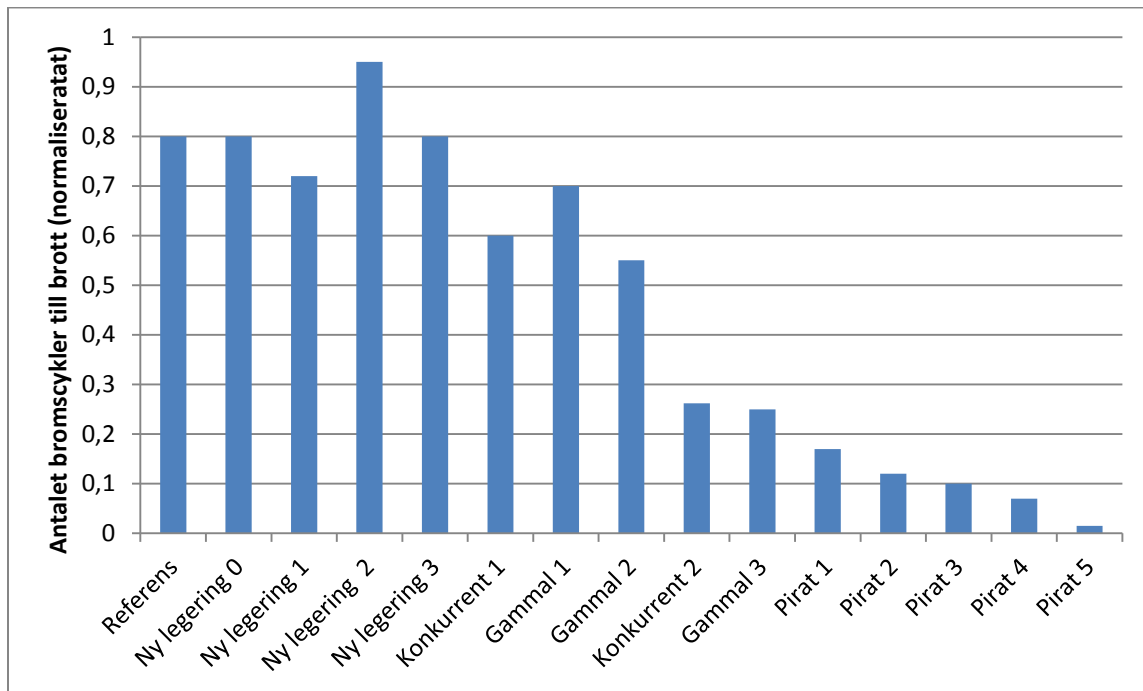
Figur 8. Uppmätta och beräknade spänningar på ett prov som är fast inspänt och utsatt för cyklisk uppvärmning och avkylning.

Det är tydligt att överensstämmelsen mellan de experimentellt uppmätta spänningarna och de beräknade är mycket bra. Däremot är skillnaden mellan den experimentellt uppmätta livslängden och den beräknade livslängden större än vad som kan accepteras. Modellen behöver i detta avseende förbättras och materialmodellering kommer att vara den viktigaste delen av det nya fortsättningsprojekt som påbörjas i juli 2013.

Nya legeringar

Arbetet har också lett till att nya materialsammansättningar lämpliga för bromsskivor har föreslagits och inom projektet har ett antal nya legeringar provgjutits. Experimenten visade en viss förbättring i både motstånd mot spricktillväxt och nötning jämfört med dagens skivmaterial. I figur 9 ses att alla dessa nya legeringar (benämnda Ny legering 0 - 3) presterar bra i bromsdynamometerprov. Legeringarna är nu patenterade och detta är ett viktigt industriellt resultat av projektet. I tabell 1 redovisas en sammanfattning av de omfattande undersökningar som gjorts på bromsskivor gjutna av de nya patenterade legeringarna.

I tabell 1 sammanfattas de viktigaste aspekterna på de olika legeringarna. Den sammansättning som är benämnd "Ny legering 2" testas nu i ett omfattande fältprov.



Figur 9. Prestandan i sprickprovet för de nya legeringarna jämfört med några andra sammansättningar.

Tabell 1: Sammanfattning av prestandan hos några nya legeringar och andra äldre sammansättningar.

	Referens	Ny legering 1	Ny legering 2	Ny legering 3	Konkurrent
Prestanda i spricktestet	Ref	–	+	=	–
Nötning av skiva	Ref	–	+	+	–
Nötning av belägg	Ref	=	+	+	+

Plus- och minustecknen indikerar en prestanda som är något bättre respektive något sämre än referensen.

5.1 Bidrag till FFI-mål

Projektets mål har på många sätt bidragit till att målen i FFI-programmet uppfylls. De metoder för rankning av nya potentiella material för bromsskivor leder till kortare utvecklingstider och att behovet av dyra och tidskrävande fullskaliga experiment minskar. Arbetet med att ta fram beräkningsmodeller som kan användas för att förutsäga livslängden och att optimera vikt och geometri leder också till att färre försök behöver göras och att tiden till marknadsintroduktion kan minskas. Vidare har inom projektet en ny legering lämplig för bromsskivor utvecklats och patenterats och det är troligt att den nya bromsskivan kommer att införas i Scantias produktion under 2014.

Projektet har lett till ett nära samarbete mellan Scania och gruppen vid Institutionen för tillämpad mekanik på Chalmers. Doktoranden Gaël Le Gigan kommer under hösten 2013 att avlägga licentiatexamen inom ramen för projektet. Det kan också nämnas att fyra olika examensarbeten har genomförts med teknologer från tre olika universitet. Två av dessa examensarbetare är nu anställda vid Scania.

Sammanfattningsvis har projektet bidragit till följande mål inom FFI-programmet.

- Projektet har stärkt fordonsindustrins konkurrenskraft
- Projektet har främjat industrirelevanta forsknings- och utvecklingsinsatser
- Projektet har stött forsknings- och innovationsmiljöer där industri och akademi samverkar.

6. Spridning och publicering

6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Den framtagna kunskapen sprids inte bara bland projektdeltagarna utan har även presenteras på internationella konferenser och genom andra öppna publikationer. Vidare kommer vissa av de resultat som erhållits inom projektet att kunna tillämpas på andra komponenter som utsätts för upprepad uppvärmning och kylning. Exempelvis har ett kunskapsutbyte initierats med ett annat FFI-projekt "Utmattnings- och interaktioner i gjutjärn, D.nr. 2012-03625". Detta projekt drivs av Scania och Avdelningen för konstruktionsmaterial vid Linköpings universitet.

6.2 Publikationer

Akademiska publikationer:

- "Thermomechanical fatigue of brake disc materials",
Gaël Le Gigan, Tore Vernersson, Roger Lundén
Presented at Eurobrake 2012, Dresden, Germany
- "Improved performance of brake discs: State-of-the-art survey",
Gaël Le Gigan, 2011, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of
Technology, Göteborg, Sweden
- "Disc brakes for heavy trucks – an experimental study of temperatures and
cracks", Gaël Le Gigan et al, Department of Applied Mechanics, Chalmers
University of Technology, Göteborg, Sweden, 2013 (in preparation).

Examensarbeten:

- "High Cycle Fatigue Properties of Niobium Alloyed Gray Iron"
Olov Johansson Berg, 2012, Master thesis, Department of Management and
Engineering, University of Linköping, Sweden
- "Mechanical Properties of Niobium Alloyed Gray Iron"
Ivil Hanna, 2011, Master thesis, Aeronautical and Vehicle Engineering,
Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- "Tribometerprovning av nioblegerade bromsskivor"
Mattias André, 2011, Master thesis, Industriell teknik och management,
Maskinkonstruktion, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- "Termomekanisk utmattning av bromsskivematerial"
Aso Fathulla och Armin Rakovic, 2010, Master thesis,
Department of Technology, University of Örebro, Sweden

Interna rapporter:

- "Brake Discs and Pads – Material Properties and Performance"
Peter Skoglund, Internal Technical Report no 7009358, 2012
- "Bromsskivor – Materialegenskaper och sprickresistans"
Peter Skoglund, Internal Technical Report no 7000270 (in Swedish), 2011,

Patent:

- "Gråjärnslegering samt bromsskiva innefattande gråjärnslegering"
Patentskrift SE 535 043 C2, Patent meddelat 2012-03-27
Peter Skoglund m.fl.

7. Slutsatser och fortsatt forskning

Ur allmän synpunkt är samarbetet mellan berörd personal på Chalmers och Scania nu väl etablerat och effektivt. Vidare sprids de förvärvade kunskaperna inte bara bland projektdeltagarna utan presenteras också på internationella konferenser och genom andra öppna publikationer.

Projektet har genererat följande:

- Metoder för rangordning av material för bromsskivor med avseende på
 - Friktionsegenskaper
 - Nötningsegenskaper
 - Motstånd mot termisk sprickbildning
- Förbättrade metoder för mätning av värmefördelningen mellan skiva och belägg och på skivan under bromsdynamometerprovning.
- Ett nytt automatiserat program för att utvärdera data från bromsdynamometerprovning
- En ny legering för bromsskivor med ökad livslängd och förbättrad prestanda har utvecklats och patenterats.

Den forskning som bedrivits inom projektet har visat att mera arbete behövs för att förbättra möjligheterna att modellera materialbeteendet och livslängden hos gråjärn under termomekanisk belastning. Detta är viktigt för att underlätta och påskynda utvecklingen av nya bromsskivor med optimerad geometri och vikt. Den nya kunskapen skulle också kunna tillämpas på andra gjutjärnskomponenter som utsätts för upprepade temperaturvariationer. Av denna anledning föreslogs ett fortsättningsprojekt benämnt "Improved performance of brake discs – Stage 2". Denna ansökan beviljades av Vinnova och det nya projektet kommer att pågå mellan juli 2013 och juni 2015. Det nya projektet kommer också att leda till att doktoranden kan avlägga doktorsexamen.

8. Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektet har drivits av Scania och Institutionen för tillämpad mekanik vid Chalmers tekniska högskola.

Kontaktpersoner:

Chalmers tekniska högskola
Professor Roger Lundén
roger.lunden @ chalmers.se

Scania CV AB:

Peter Skoglund (projektledare)
peter.skoglund @ scania.com