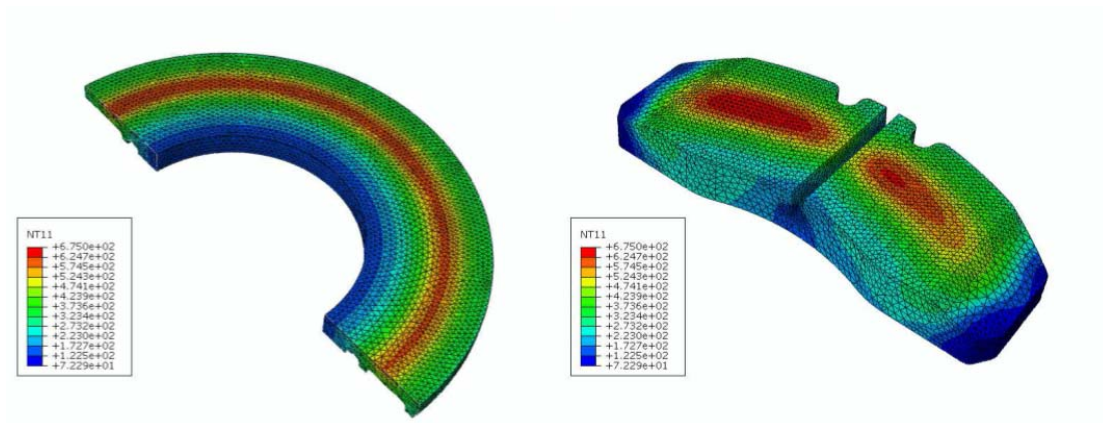


Termomekanisk simulering och optimering av skivbromssystem – Del II



Författare: Staffan Johansson and Per Hasselberg

Datum: 2014-12-15

Delprogram inom < Fordons & Trafiksäkerhet >



Content

1. Sammanfattning	3
2. Bakgrund	4
3. Syfte	6
4. Genomförande	9
4.1 General project description	9
5. Resultat	11
5.1 Bidrag till FFI-mål	11
5.2 Sammanställning av resultat i referens till den generella projektbeskrivningen	12
6. Spridning och publicering	13
6.1 Kunskaps- och resultatspridning	13
6.2 Publikationer	13
7. Slutsatser och fortsatt forskning	13
8. Deltagande parter och kontaktpersoner	14
9. Referenser	15

FFI in short

FFI is a partnership between the Swedish government and automotive industry for joint funding of research, innovation and development concentrating on Climate & Environment and Safety. FFI has R&D activities worth approx. €100 million per year, of which half is governmental funding. The background to the investment is that development within road transportation and Swedish automotive industry has big impact for growth. FFI will contribute to the following main goals: Reducing the environmental impact of transport, reducing the number killed and injured in traffic and Strengthening international competitiveness. Currently there are five collaboration programs: **Vehicle Development, Transport Efficiency, Vehicle and Traffic Safety, Energy & Environment and Sustainable Production Technology.**

For more information: www.vinnova.se/ffi



1. Sammanfattning

Bromssystemet är ett viktigt system i alla fordon som måste fungera tillfredställande i alla driftsförhållande i trafik. Skivbromsen är vanligt förekommande i dessa system och används idag även till stor del i bromssystem för tunga fordon. En viktig orsak till detta är att automatisk bromsreglering är enklare att anpassa till skivbromsen än den traditionella trumbromsen. När ett fordon inbromsas transporteras stora effekter i form av rörelseenergi till värme via friktionsförluster mellan skiva och bromsbelägg. Värmeenergin leder till temperaturökningar i systemet som kan vara flera hundra grader i exempelvis bromsskivan. Höga temperaturer eller många stora temperaturcykler kan leda till att systemet tappar bromsförmågan eller mister bromsförmåga. Det senare är självklart ett förlopp som ej får ske i trafik. Bromssystemet måste därför vara tillräckligt robust och tillförlitligt för att utesluta sådana scenarios. Ett väl definierat processfönster för bromssystemet är därför nödvändigt, speciellt vid användningen av automatisk reglering. Idag skapas sådana processfönster uteslutande av fysiska bromsförsök som i stor utsträckning genomförs i bromsrigg. Dessa försök är kostsamma och tar lång tid att genomföra. Det vore önskvärt om försöken kunde kompletteras med datorsimuleringar. Tyvärr är beräkningstiden för lång med standardmetoder som finns i dagens kommersiella mjukvaror. Anledningen finns i den etablerade formuleringen (Lagrange) som används för solida kroppar där det finita elementberäkningsmätet (meshen) följer med kroppen. I fallet med bromsskivan blir det kostsamt att rotera beräkningsnätet flera varv i kombination med lösning av det termomekaniska friktionsproblemet.

En idé vore att istället formulera skivan med ett fixerat beräkningsnät (Eulerskt) som typiskt används i fluidmekanik och låta skivan rotera igenom beräkningsnätet. I detta projekt har denna idé använts för att utveckla en toolbox där värmeutveckling i bromsskiva och bromsbelägg kan studeras virtuellt både effektivt och noggrant. Toolboxen är utvecklad för 3-dimensionell geometri med kontakt, friktion och nötning mellan skiva och bromsbelägg. Friktionsvärmens leds bort med klassisk värmeledning, och skivan och bromsbelägget utvidgas och deformeras med klassisk termoelasticitet. Temperaturhistorik från fysiska bromsförsök är simulerad med toolboxen och mycket god överensstämmelse är erhållen. Ett gränssnitt mot den kommersiella programvaran Abaqus är också utvecklat. Med detta gränssnitt kan temperaturhistoriken från toolboxen användas i Abaqus för att studera termiska restspänningar. För detta ändamål har en temperaturberoende plasticitetsmodell utvecklats som beskriver bromsskivans egenskaper vid olika temperaturer. Simuleringarna visar att positiva dragspänningar i omkretsled utvecklas vid upprepade inbromsningar. Sådana spänningar kan förklara radiella sprickor som kan utvecklas i försök vid hårda upprepade inbromsningar.

Detta arbete har resulterat i två publikationer, en journalartikel samt en konferensartikel.

Den ansvariga professorn i detta projekt initierade projektet under Högskolan i Jönköping (JTH). På grund av en dispyt mellan ledningen för JTH och ansvariga professorn avslutades den ansvariga professorn sin anställning på JTH innan projektet färdigställdes.



Detta projekt återstartades efter att den ansvariga professorn bytt arbetsgivare till Högskolan Väst. Tyvärr lämnade den ansvariga professorn Högskolan Väst efter en kort stund, detta p.g.a. personliga skäl. Eftersom den ansvariga professorn hade en viktig verkställande roll i detta projekt så fanns det inte mycket nytta att fortsätta projektet med det existerande konsortiet. Således har endast en mindre mängd av projektmedel spenderats och projektmålen uppfylldes ej.

Projektet nådde som sagt inte de definierade målen. Den nuvarande strävar är att initiera projektet med en ny akademisk partner. Denna process har redan inletts mellan Volvo och ett universitet som är välkänt inom området kontaktmekanik.

2. Bakgrund

Detta projekt är en fortsättning av projektet "Termomekanisk simulering och optimering av skivbromssystem" diariennr. 2009-00086. Slutrapporten för projekt 2012-00046 har i denna rapport förkortas på grund av likheterna med projekt 2009-00086. För mer detaljerad information rekommenderas slutrapporten från projekt 2009-00086 som referens.

Skivbromsar används för att minska eller justera hastigheten för ett fordon, förändringen i hastighet åstadkoms genom att bromsbelägg trycks mot en roterande skiva. Den process omvandlar den kinetiska energin hos det rörliga fordonet till värme. Denna värme får yttemperaturerna i bromsbelägg och bromsskiva att stiga under en mycket snabbt. Den höga temperaturen kan orsaka formfel, fasomvandling (i fall av gjutjärn) eller utmattnings sprickor bromsskivans yta. Vid högre temperaturer, kan beläggsmaterialets prestanda minska (eng. thermal fade) och slitagehastigheten kan öka. Det är därför önskvärt att hålla bromsskivan och bromsbeläggets yttemperaturer till ett minimum. Samtidigt som det är önskvärt att erhålla låga temperaturer i skivbromssystemets komponenter är det också önskvärt att maximera bromsenergi, dvs. den energi som omvandlas till värme under en inbromsning.

Flera "intelligenta" aktiva säkerhetssystem har utvecklats de senaste åren, denna utveckling kommer mest sannolikt att fortsätta i framtiden. Många av dessa "intelligenta" system använder bromsen på olika sätt, som kontrolleras av algoritmer som använder mätsignaler som beskriver hastighet, hjulslip, GPS-signal, avstånd (radar, laser) etc. Exempel på dessa system är Electronic Brake System (EBS), Adaptive Cruise Control (ACC) där föraren ställer in önskad hastighet och om ett fordon kommer för nära framför bilen bromsas automatiskt fordonet, köassistens där föraren får hjälp i bilköer, bromsregleralgoritmer etc.

Aktiva säkerhetssystem som påverkar bromsens användande kommer att utsätta skivbromskomponenter för en ny typ av belastningscykel (t.ex. att värmebelastningen på bromsskivan förändras). Detta kan medföra att de rådande konstruktionskriterierna kan komma att behöva uppdateras. Det krävs förbättrad kunskap om de bakomliggande

mekanismerna för värmeskivsprickor och om komponenternas utmattningshållfasthet etc. Det krävs också kunskap om vilken typ av driftsfall de aktiva säkerhetssystemen påverkar (och hur dessa påverkas) primärt för utveckling av bromskomponenter men också framåt för att till fullo kunna utnyttja den fulla potentialen i framtida aktiva säkerhetssystem. Flera tidigare studier, examensarbete samt projektarbete på Volvo har visat på vikten av kunskap inom termiska aspekter och bromsprestanda och komponentlivslängd och hur i vilken utsträckning nya aktiva säkerhetssystem påverkar utformningen av bromsarnas hårdvara.

Valideringsdelen inom utvecklingsprocessen i ett skivbromssystem är mycket kostnadskrävande, detta på grund av omfattande riggtester som krävs. På grund av komplexiteten i skivbromssystem kan det vara svårt att kvantifiera samtliga viktiga parametrar som är mycket viktiga för ökad förståelse i ett riggprov. Sett ur ett längre perspektiv kan det framåt vara svårt att analysera de effekter som olika aktiva säkerhetssystem ansätter bromssystemet för i vanliga testriggar.

De ingående komponenterna i skivbromsen som beaktas i detta arbete visas i Figur 1, vänster. I figuren visas en snittvy av skivan för att bättre beskriva dess interna design (patenterad [1]). Detta är de ingående komponenterna i ett skivbromssystem för en Volvolastbil (dock alla komponenter i bromssystemet inte medtagna i denna figur).

Ytan på den inre periferin på skivan används för att montera skivan till hjulnavet mha. ett splinesförband. Vid simuleringen av friktionsuppvärmningen är splinesförbandet ej modellerat eftersom förbandet antas ha liten effekt på värmetransporten, man har således valt att förenkla modellen på detta vis. Likaså har även viss form av bromsbelägget förenklats. Den förenklade modellen av bromssystemet visas i Figur 1, Höger.



Figur 1. Vänster: Ingående komponenter i skrivbromsen. Höger: Ingående komponenter i skrivbromsen sett från ett simuleringsperspektiv där komponenternas geometrier är något förenklade



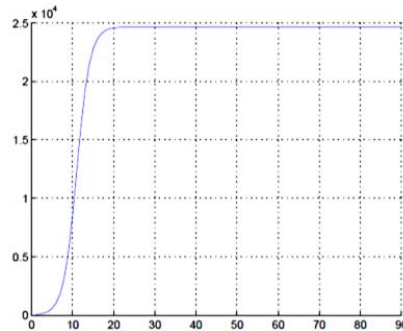
3. Syfte

Den värme som utvecklas i bromsen under inbromsning varit det huvudsakliga föremålet för analys i detta projekt. I studierna av termiska samband inkluderas; förutsägelse av storleken för en termisk ökning, konsekvenserna för komponenter av en ökad temperatur och ökad cykling temperaturer och hur värmeenergi hanteras ur ett designperspektiv. Temperaturen på bromsskivan kan öka snabbt, även vid relativt liten användning av bromsen. För att exemplifiera temperaturökning skall följande exempel betraktas:

Förmoda en bromsapplikation med en varaktighet på 20 s vid ett bromstryck som endast uppgår till 10% av det maximala bromstrycket. Förmoda att denna bromsapplikation upprepas fem gånger med 60 s ”kylningstid” mellan bromstillämpningarna. Den initiala temperaturen antas vara 100 ° C vilket anses som en typisk arbetstemperatur. Efter 1:a applikationen är bromsskivans temperatur är 160° C, efter 2:a 220° C, efter 3:e 250° C, efter 4:e 340° C och efter den 5:e 400° C. Som angivits ovan, är dessa de interna skivtemperaturerna. Det är dock inte i kärnan av bromsskivan som utmattningssprickorna initieras; det är på ytan av skivan. Temperaturen på ytan kommer att vara betydligt högre för bromsförfarandet som angetts ovan; närmare bestämt 625° C efter den 5:e iteration.

De senaste årens utveckling har givit en stor ökning av beräkningskraft vilket har öppnat nya möjligheter för avancerade datorbaserade simuleringar. I dag används det fullt kopplade Lagrange-strategin i kommersiell programvara för att simulera friktionsuppvärmning av skivbromsar. Med detta angreppssätt roteras det finita element-rutnätet (meshen) som beskriver bromsskivan relativt det beräkningsnät som beskriver bromsbelägget. Vid detta förfarande utförs den termiska och mekaniska analysen samtidigt. Även om detta tillvägagångssätt fungerar bra är det inte praktiskt möjligt att använda på grund av extremt långa beräkningstider. För att lösa problemet med de långa beräkningstiderna har en sekventiellt kopplat angreppssätt använts, i detta utförs den termiska och den mekaniska analyserna sekventiellt. En ”in-house”-programvara har utvecklats vilken den termiska analysen m.h.a. ett Eulerskt beräkningsrutnät, i detta roterar inte bromsskivans beräkningsnät i förhållande till bromsbelägget, istället strömmar materialet genom beräkningsnätet. Temperaturhistoriken från analysen av friktionsvärme används som input i en kopplad spänningsanalys som utförs i den kommersiell programvaran Abaqus. Denna sekventiella metod kräver betydligt lägre beräknings tid jämfört med den ovan nämnda Lagrange-strategin.

Utvecklingen av mjukvaran var uppdelat i *två delar*; I den *första delen* har den interna programvara utvecklas för att utföra termisk analys av en bromsskiva. I denna analys tillämpas inte bromskraften momentant utan den ”rampas” upp med hjälp av en log-sigmoid funktion. Figur 2 visar en typisk upprampning av bromskraften.



Figur 2. Upprampning av bromskraft vid termiskt analys

På grund av de högt påkända driftcyklerna för bromsen kan radiella makrosprickor initieras bromsskivan [II, III]. Det är därför viktigt att studera hur en bromsskiva är påkänd och slutligen uppskatta dess utmattningstidslängd. I den **andra delen** har de termiska spänningar för bromsskivan analyserats. Analysresultaten visar att under hård inbromsning genereras tryckspänningar i omkretsriktningen på skivytan som orsakar plasticering. När sedan skivan svalnar omvandlas dessa tryckspänningar till dragspänningar. För upprepade bromsningar av denna form av spänning-töjning upprepas genereras (efter en viss tid) spänningar med mycket hög amplitud som möjligtvis kan generera lågcykelutmattning med propagerande utmattningssprickor som följd.

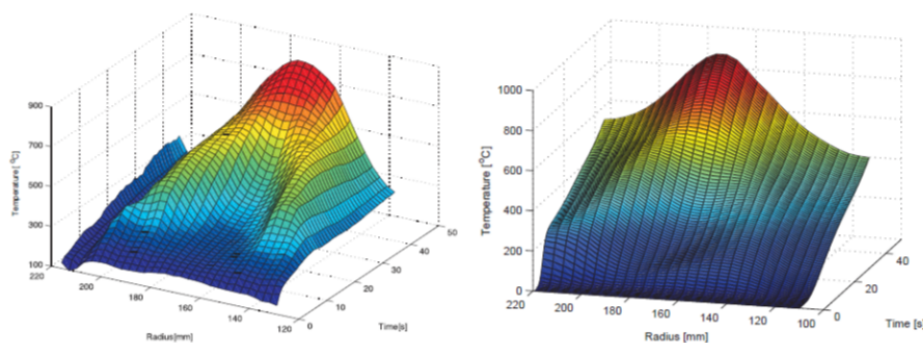
För spänningsanalysen analyseras först mängden friktionsvärme som produceras. Detta analys har visat att s.k. ”hot band” dvs. ring(ar) av höga v höga temperaturer kan urskiljas i mitten av skivytan. I denna simulering har en bromskraft av 24,5 [kN] appliceras i 20 [s] på den bakre ytan av bromsbelägget. Vinkelhastigheten för skivan är 45 [rad/s], denna hålls konstant genom hela simuleringsförloppet. Bromskraften rampas upp med hjälp av en log-sigmoid funktion under 20 tidssteg och sedan hålls konstant under de kommande 80 beräkningssteg med tidssteg $t = 0.2$ [s]. Detta lastfall motsvarar en lastbil som bromsar (men håller en konstant hastighet) i en nerförsbacke. Friktionskoefficienten i beräkningen är $\mu = 0.3$ konduktanskoefficienten satt till $\phi = 0.1$ [W/NK] och konvektionskoefficienten sätts till 50 [W/m²K]. Efter bromsning kyls bromsskivan i 5000 [s] med ett tidssteg på 5 [s], efter denna tid nås ursprungstemperaturen. Temperaturer som beräknats fram importerats till den kommersiella programvaran Abaqus i vilken spänningsanalys utförs. För upprepade bromsningar antas det att förhållandena är lika vid bromsningen oavsett om det är en upprepning eller om det är den första bromsningen som utförs, detta medför att de temperaturer som beräknas fram kommer att vara likartade för samtliga upprepningar. Resultaten från simuleringen visar att den termiska spänningsökningen ger en större amplitud än spänningsökningen som beror av mekanisk påkänning. Detta kan förklaras av den temperaturberoende värmeutvidgningskoefficient. De ovan nämnda spännings-töjnings cyklerna kan ge upphov till lågcykelutmattning vilket kan generera radiella sprickor på bromsskivan.

Efter beräkningen de ingående spänningarna kan livslängden räknas fram för bromsskivan. Detta bygger dock på att materialparametrarna som beskriver utmattningshållfasthet är kända. Eftersom att det är uppenbart att materialet på skivans

yta genomgår betydande plastisk deformation krävs en beräkningsmetod som tar spänning-töjningsförloppet i beaktande, detta är nödvändigt om det skall vara möjligt att förutsäga bromsskivans utmattningslivslängd. En sådan studie har genomförts i detta projekt genom att använda den modellen/ekvationen framtagen av Coffin-Manson. Materialparametrarna i denna studie erhöles från litteraturen. Det resulterande termiska beteendet och hur temperaturökningen formmässigt på bromskomponenterna finns beskriven i resultatkapitlet.

Slitage på ett bromsbelägg ser kanske inte ut att spela en stor roll då endast en broms cykel analyseras, men ackumulerat slitage under flertalet broms cykler påverkar temperaturfördelningen och därmed påverkas även det termomekamekaniska beteendet för bromsskivan. För att studera hur slitage för bromsbelägget utvecklades togs en simuleringsmodell fram, i denna modell användes samma parametrar som för modellen i föregående stycken (bromskraft, tid för bromsning, vinkelhastighet, friktionskoefficient, slitage koefficient, konduktans koefficient och konvektiv koefficient). Totalt analyserades 40 bromsansättningar i vilka bromsbeläggets slitage analyserades kontinuerligt. Resultatet från denna beräkning visade att slitage blev koncentrerat mitt på bromsbelägget, detta möjliggör de s.k. ”hot bands”. Intuitivt kan det tänkas att slitage bör vara större mot den yttre kanten av bromsskivan men beräkningsresultatet visar att slitage koncentreras runt mitten av dynan yta.

Som ett led i valideringen av den utvecklade simuleringsmetoden har temperaturerna som predikterats m.h.a. ”in-house”-programvaran har jämförts med de temperaturer som mätts m.h.a. värmekamera under ett fysiskt test. Den mätta temperaturen visade sig vara något högre än den framräknade temperaturen, se Figur 3. Med hjälp av värmekamera var det möjligt att validera den specifika temperaturvariation, de s.k. ”hot bands”. Som framgår av figuren bekräftas två ”hot bands”, återkommande både i simuleringsresultatet och mätningen, dock var det termiska fenomenet något mer distinkt i mätningen jämfört med simuleringsresultatet.



Figur 3. Temperatur plottad som en funktion av tid och bromsskivageometri (radie)Vänster: Mätresultat från värmekamera mätt i bromsdynamometer. Höger: Resultat från jämförbar bromssimulering

De observerade skillnaderna kan bero på ofullständiga parametrar såsom materialdata, friktionskoefficient och slitagekoefficient.



För att erhålla en bättre förståelse för termiska aspekter av grundläggande bromssystem har en ny typ av tillvägagångssätt används i detta projekt. Det traditionella sättet att simulera friktionsuppvärmning av skivbromsar är att använda en s.k. Lagrange-approach där beräkningsnätet (finita element) för bromsskivan roterar relativt ett bromsbelägg. Även om detta tillvägagångssätt fungerar bra är det förenat med extremt långa beräkningstider. För optimeringsstudier av bromsar är detta tillvägagångssätt inte praktiskt. Eftersom bromsskivan är rotationssymmetrisk är det möjligt att modellera skivan med en s.k. Eulersk uppställning, med denna uppställning "strömmar" materialet genom beräkningsnätet. I denna uppställning är bromsskivan stationär. Beräkningsmässigt är detta tillvägagångssätt mycket mer tidseffektivt jämfört med Lagrange-approachen. I den första delen, diariernr. 2009-000086, av detta projekt, Termomekanisk simulering och optimering av skivbromssystem har en Eulersk beräkningsstrategi utvecklats och implementerats. I detta projekt användes den utvecklade toolboxen för att utföra analys av hur friktionsvärme genereras. I den Eulersk uppställningen är kontaktrycket inte konstant utan varierar vid varje tidssteg som en funktion av de termomekaniska deformationerna på bromsskivan och bromsbelägget. Detta kontaktryck används för att beräkna värmeutveckling och värmefflöde till närliggande komponenter för varje tidssteg.

4. Genomförande

4.1 Generell projektbeskrivning

På grund av projektets komplexitet delades upp i fyra faser.

Fas ett

I fas Ett skapades den globala modellanalysen av skivbromssystemet m.h.a. modellering, definiering av randvillkor etc. Korrelation mellan simulerade och uppmätta resultaten sker på en global nivå, t.ex. genom att liknande termiska mönster på bromsskivans yta och jämförbara temperaturnivåer inom väl definierade områden uppnås. I denna del har flera parametrar studerats såsom beteendet friktionsegenskaperna mellan bromsskiva och bromskloss, egenskaper för omfördelning av den termiska belastningen, ledning och konvektion. Komplexiteten ökar ytterligare på grund av materialegenskaper som ev. är temperaturberoende. För att kunna lösa FE beräkningar effektivt skapades en egen programvara, denna programvara har sedan vidareutvecklats och används i alla faser.

Fas två

Nu när den globala simuleringsmodellen väl var korrelerad mot fysiska tester fortsätts arbetet i Fas Två med att bygga upp detaljkunskap om friktionsvärme, värmespanningar, skivsprickor och utmattningslivslängd, slitage på skiva bromsbelägg. För en fullständig av förloppet är det även viktigt att ta tillverkningsaspekter i beaktande, t.ex.



restspänningar. Under en broms cykel kan restspänningar lättas upp vilket bidrar till en osymmetrisk deformation av bromsskivan.

Fas tre

Med den djupare kunskap som erhållits i Fas Två, initierades Fas Tre i undersökning om sambandet mellan termiska spänningar, materialparametrar, slitage etc. för att ta reda på vad vilka parametrar som möjliga att optimera. Huvudfokus gällde optimering av de mest signifikanta parametrarna, t.ex. utmattningstidslängd. Denna analys grundade sig i optimering av responsytor.

Det har visats att endast en del av bromsbelägget är i kontakt med bromsskivan och att kontaktryckfördelning inte är likformigt över beläggets yta. På de positioner där kontaktrycket är högre genereras mer värme, detta som resulterar i högre temperatur lokala temperaturer. Det finns många faktorer som påverkar kontaktryckfördelningen t.ex. termiska deformationer, slitage och beläggets materialegenskaper. Ett sätt att minska lokala höga temperaturer är att göra fördelningen kontaktrycket mer uniform. Fördelningen kontaktrycket påverkas starkt bromsbeläggets geometri. I optimeringen av bromssystemets geometriska beskaffenhet kan det vara så att tekniska parametrar är motstridiga. Det är med detta sagt inte möjligt att optimera ett bromssystem som uppfyller samtliga önskvärda geometriska- och prestandaparametrar. Därför krävs en avvägning mellan olika mål och en uppsättning lösningar som tillhandahåller en mer global lösning för samtliga parametrar (utan sub-optimering). Med hjälp av multi-objektiv optimering kan en mer global lösning erhållas, multi-objektiv optimering har således använts i detta projekt.

Fas fyra

Fas fyra inleddes under del ett, diarienumr.2009-00.086. I fas fyra simulerades några uppmätta bromssekvenser i bromssimuleringstestrigg. Bromssimuleringstesttriggen (SIL) genererade indata med de viktigaste parametrarna (fordonshastighet, bromstryck, tidssignal etc.) som användes i de termiska FE beräkningar. Det ursprungliga projektet fungerade som en förstudie för detta projekt, man insåg att denna fas behövde delas upp i två delar: dels en bromsdynamometer modellerades och i del två den verkliga bilen modellerades.

Tanken var att modellera den virtuella testtriggen med hjälp av dynamiska ekvationer av multi-body-system, energibalansen i bromsbelägget och skivan och friktionskontakten mellan belägg och skivan och i detta finna en strategi som är robust och effektiv.

Då det var möjligt att nå en överenskommelse mellan den virtuella testtriggmodell och den verkliga riggen svar nästa steg var att tillämpa metodiken på en simuleringsmodell för ett komplett fordon. Metoden skulle byggas på ett sådant sätt att kompletta fordonssimuleringar var tidsmässigt möjliga/realiserbara.



5. Resultat

Resultaten är indelade i två sektioner, (1) Bidrag till FFI-mål som specificerar resultaten enligt målen för <Fordons & Trafiksäkerhet> programmet, (2) Sammanställning av resultat i referens till den generella projektbeskrivningen

5.1 Bidrag till FFI-mål

Detta projekt kommer att bidra till en del av de mål som fastställs för <Fordons & Trafiksäkerhet> program. I det långa loppet kommer förvärvade kunskaper från detta projekt resultera i förbättrad bromsprestanda (t.ex. kortare stoppsträcka)

Volvos erfarenhet av aktiva säkerhetssystem som använder bromsen är att automatiska system kommer att generera en annan typ av energifördelning jämfört med "manuell" bromsning av erfarna förare. Följaktligen kommer de mekaniska komponenter som idag används för ett visst lastspektrum kan tvingas, tack vare de aktiva säkerhetssystemen arbeta i ett betydligt mer påkänt lastspektrum. För att illustrera detta låt oss anta att ett ACC-systemet kommer att leda till en ökad framtida lastspektrum. För att möjliggöra täckning av nämnda ökad belastning man skulle välja mellan två alternativ; (1) designa skivbromskomponenter och omgivande komponenter för att förbättra kylningsprestanda med motsvarande den temperaturökning som orsakas av högre belastning eller (2) skaffa sig kunskap om de olika fenomen som är påverkar energitransporterna i bromssystemet och vad som styr bromsens prestanda och dess egenskaper. Det första alternativet ger begränsade förbättringar (men det är givetvis tänkbart att kombinera alternativ 1 och 2). Om det andra alternativet efterföljs ger detta förutsättningen att tillgodogöra och förstå beteendet hos de olika fenomen som skivsprickor, termisk utmattning etc. Med kunskap kan komponenternas utformning till en större grad skapa en större grad av temperaturbeständighet. Sammantaget har det huvudsakliga resultatet av detta projekt varit att öka kunskapen om hur man designar mer robusta och tillförlitliga skivbromskomponenter för att konstruera komponenter som med de rätta säkerhetsmarginalerna mot termiska fenomen och för att tillåta de aktiva säkerhetssystemen att använda bromsen i önskvärd omfattning.

Den kunskap som erhållits i detta projekt kommer att tjäna som grund för kommande aktiva säkerhetssystem i vilka där bromsarna används. Följaktligen kommer kunskap från detta projekt att öppna upp för möjligheten till nya eller förbättrade aktiva säkerhetssystem t.ex. EBS, ESP, ACC, queue support etc.

Detta projekt har fungerat som en mycket viktig del i att bygga upp samarbetet mellan industri och universitet gällande datorbaserad analys av skivbromssystem och virtuell validering av skivbromssystem kopplade till aktiva säkerhetssystem.



Virtuell testning av skivbromscyklar med olinjär FE har utförts i detta projekt. Det är tydligt att termomekanisk analys av FE-analys kan användas för att simulera olika fenomen som förekommer i en bromscykel.

Ett långsiktigt mål i detta och kommande projekt är att initiera studier i s.k. ”optimisation driven design” för skivbromssystemet. Den traditionella designprocessen kan i detta sammanhang benämnas som iterativ/intuitivt, i denna typ av process görs manuella (iterativa) designförändringar som inte bygger på slutsatser eller trender från avancerat beräkningsunderlag.

5.2 Sammanställning av resultat i referens till den generella projektbeskrivningen

Eftersom omfattningen av detta projekt länkar till ett redan genomfört projekt ingår båda projekt ingår i denna sammanfattning.

”Bas” projekt (diariernr. 2009-00086))

- Grundforskning, ökning av generell kunskapsnivå → **Basplattform**
- Numerisk plattform, simulation-toolbox för robusta and effektiva simuleringar

Nuvarande projekt (diariernr. 2012-00046)

- Detaljerade studier av parametrar och mekanismer
- Förbättrad korskoppling med bromssimuleringstriggen
- **Implementering** av de utvecklade metoderna och kunskapens i design- och valideringsprocessen

	Basprojekt (Rno. 2009-00086)		Nuvarande projekt (Rno. 2012-00046)	
	Uppfyllande av planerat	Uppfyllande av totalt scope	Uppfyllande av planerat	Uppfyllande av totalt scope
Fas ett	■	■	■	■
Fas två	■	■	■	■
Fas tre	■	■	■	■
Fas fyra	■	■	■	■

Figur 4. Sammanfattning av projektplanen (innehållande dess fyra faser) och dess fullföljande.



6. Spridning och publicering

6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Sett utifrån både ett akademiskt och industriellt perspektiv är resultatet från denna utvecklade bromsberäkningen mycket användbart. Till dags dato har man kunnat verifiera resultatet från beräkningar i industriella bromsprov som är utförda i bromsdynamometern i Göteborg. Med hjälp av värmekamera som använts vid faktiska bromsprov har det varit möjligt att validera de termiska fördelningar i bromssystemet som har tagits fram med simuleringsverktygen (se Figur 3).

Genom att använda den utvecklade koden och kombinera denna med faktorförsök (som praktiskt taget bara är möjligt då beräkningstiden har minskats avsevärt) och genom att kombinera detta med specifika optimeringstekniker har det varit möjligt att konstruera/designa bromsar med maximerad prestanda (utmattningshållfasthet och bromsmoment), detta med en minimerad komponentvikt.

6.2 Publikationer

K. Amouzgar, A. Rashid and N. Stromberg. Multi-Objective Optimization of a Disc Brake System by Using SPEA2 and RBFN, ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference

N. Stromberg, A coupled thermo-flexible multi-body approach for virtual rig testing of brake discs, V International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering COUPLED PROBLEMS 2013

7. Slutsatser och fortsatt forskning

I detta arbete har en ny typ av termisk lösningsmetodik (flerkropp) utvecklats i syfte att simulera rigtestförsök med skivbromsar. Denna metodik har visat sig vara mycket robust och effektiv, detta har bl a demonstrerats genom validerande simulering av ett reellt bromsprov i bromsdynamometer. Vid simulering av prestandafaktorer för skivbromsen har det visat sig att flertalet parametrar motverkar varandra, det är därför nödvändigt att applicera en avancerad form av optimeringsberäkningar för att bättre förstå parametervariationen. Inom ramen för detta projekt har det också visats att ny typ av försöksplanering har visat sig vara ett kraftfullt verktyg då optimeringsberäkning utförs för skivbromssystemet.

Huvudpunkten i detta projekt har varit att öka förståelsen för de termiska egenskaperna för ingående komponenter i bromssystemet. Framåt skulle det vara önskvärt att inkludera



fler komponenter i simuleringssmodellen i t.ex. splinesförbandet vid den inre skivans periferi samt en mer detaljerad modell av bromsbeläggets geometri (back plate). I en framtida simuleringssmodell skulle det även vara önskvärt att inkludera närliggande komponenter såsom navet och hjullagret, både för att få en mer detaljerad modell av det termiska flödet och även kunna få möjlighet att studera termiska egenskaper på angränsande komponenter som bromsen påverkar (termiskt).

I denna studie förenklades bromsförloppet (såsom t.ex. nämns i bakgrund) med en konstant frekvens på 20 s bromsning som efterföljdes av 60 s kylning. Detta är inte en exakt återgivning av en bromscykel, ett givet nästa steg vara att använda en mer komplicerad cykel som ”spelats in” i ett befintligt fordon. Simulering av en mer komplicerad cykel kan kräva en anpassning av iterationen algoritmer, mer specifikt det tidsinkrement / tidssteg som används för en bromsning och kylningscykel .

Funktionsdugligheten för dessa parametrarna som ingår beräkningsmodellen bör analyseras djupare:

Friktionskoefficienten för ett bromsbelägg är generellt beroende av temperatur, hastighet och kontakttryck [IV], i denna simulering har dock ett konstant värde på $\mu = 0,3$ antagits för att representera/efterlikna ett genomsnittligt beteende. På samma sätt är nötningskoefficienten beroende av temperatur och hastighet [V, VI]. I detta arbete antas dock en konstant nötningskoefficient på 10^{-10} [m² / N]. Det finns mest troligen ett starkt beroende mellan starkt beroende mellan temperatur och nötningskoefficienten, särskilt vid höga temperaturer [V, VI]. För framtida simuleringar är det önskvärt att mäta ett representativt värde av nötningskoefficienten för ett givet bromsbelägg. Dessutom görs idag antagandet att den konvektiva koefficienten är samma för alla ytor, detta antagande kan förfinas avsevärt.

I spänningsanalysen har en materialmodell använts som antar samma materialbeteende oavsett drag- eller tryckspänning, i verkligheten gjutjärn har olika egenskaper för drag och tryckpåkänning. Materialdatan för det gjutjärn som har använts bör också förfinas, speciellt gällande egenskaper relaterade till utmattning.

8. Deltagande parter och kontaktpersoner



Per Hasselberg (Project leader),
per.hasselberg@volvo.com,
031-322 81 26
Staffan Johansson,
staffan.sj.johansson@volvo.com,
031-322 99 66



Niclas Strömberg (Supervision), -, -
Asim Rashid (PhD student),
asim.rashid@jth.hj.se, 036-10 16 98

9. Referenser

- [I] J. Hulten and I. Dagh. Brake disc for a vehicle disc brake, August 29 2006. US Patent 7,097,010.
- [II] D.J. Kim, Y.M. Lee, J.S. Park, and C.S. Seok. Thermal stress analysis for a disk brake of railway vehicles with consideration of the pressure distribution on a frictional surface. *Materials Science and Engineering A*, 483-484(1-2 C):456459, 2008.
- [III] F. Bagnoli, F. Dolce, and M. Bernabei. Thermal fatigue cracks of fire fighting vehicles gray iron brake discs. *Engineering Failure Analysis*, 16(1):152163, 2009.
- [IV] A. Heussa, L. Dubar, T. Tison, M. Watremez, and R.F. Nunes. A methodology for the modelling of the variability of brake lining surfaces. *Wear*, 289:145-159, 2012.
- [V] U.S. Hong, S.L. Jung, K.H. Cho, M.H. Cho, S.J. Kim, and H. Jang. Wear mechanism of multiphase friction materials with different phenolic resin matrices. *Wear*, 266(7-8):739-744, 2009.
- [VI] A. Saffar, A. Shojaei, and M. Arjmand. Theoretical and experimental analysis of the thermal, fade and wear characteristics of rubber-based composite friction materials. *Wear*, 269(1-2):145-151, 2010.



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

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