



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

Ökad utmattningshållfasthet i gjutjärn genom optimering av restspänningar



Taina Vuoristo
Februari 2014-02-14
Fordonsutveckling

Innehåll

1. Sammanfattning.....	3
2. Bakgrund	4
3. Syfte.....	6
4. Genomförande.....	6
5. Resultat	7
5.1 Bidrag till FFI-mål	10
6. Spridning och publicering.....	11
6.1 Kunskaps- och resultatspridning	11
6.2 Publikationer	11
7. Slutsatser och fortsatt forskning.....	12
8. Deltagande parter och kontaktpersoner	13

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

Gjutjärn är de främsta materialen för cylinderhuvuden till dieselmotorer för tunga fordon. Kraven på bränsleekonomi, låga emissioner och ökad motoreffekt ökar ständigt. För att möta de höga kraven på utmattningshållfasthet måste man antingen ersätta de nuvarande materialen eller förbättra dem. Att ersätta dagens gråa gjutjärn med *t.ex.* kompaktgrafitjärn (CGI) är varken trivialt eller okomplicerat.

Restspänningar är interna spänningar som är oberoende av den pålagda belastningen. Dessa spänningar har en betydande påverkan på utmattningshållfastheten hos material: dragrestspänningar anses vanligen vara ofördelaktiga medan tryckrestspänningar betraktas som fördelaktiga med avseende på utmattningshållfastheten. Förbättring av egenskaperna hos gråjärn genom optimering av restspänningarna, till exempel genom kulpning av kritiska punkter, erbjuder en fördelaktig och kostnadseffektiv lösning. För att man ska kunna optimera restspänningstillståndet måste man förstå fullständigt hur dessa spänningar uppstår under olika tillverkningsprocesser.

Projektets huvudmål är att öka utmattningshållfastheten hos gjutjärnskomponenter med 20 % genom optimering av restspänningar. Den ökade utmattningshållfastheten möjliggör också en viktminskning tack vare tunnare väggsektioner. Man utvecklar också metoder för snabb och tillförlitlig mätning av restspänningar. Såväl ökad förståelse av korrelationen mellan restspänningar och utmattningstidslängd som förståelse av och kompetens inom området restspänningar i inhomogena material, särskilt gjutjärn, är också önskvärt.

Projektet har genomförts i samarbete med Avdelningen för Konstruktionsmaterial vid Linköpings Universitet, Volvo Group Trucks Technology och Scania CV AB, under tidsperioden från 1 januari 2011 till 31 december 2013. Linköpings Universitet har haft ansvaret för det mesta av det teoretiska arbetet, mätningar av restspänningar och undersökningar med användning av svepelektronmikroskopi (SEM, EBSD). Scania och Volvo har varit ansvariga för tillverkning av provobjekt, för att hitta ytbehandlingsleverantörer och för att genomföra utmattningsprov.

Projektresultaten visade att varsam kulpning ökar hållfastheten mot *böjutmattning* hos kompaktgrafitjärn (CGI) med minst 20 % och hos gråjärn (LGI) med minst 10 %. Varsam kulpning kombinerad med kortvarig glödning ökar gråjärns hållfasthet mot *axiell utmattning* med cirka 10 %, medan kraftig kulpning minskar hållfastheten mot *axiell utmattning*, både hos släta och anvisade provstavar, med cirka 20 %. CGI reagerar något bättre på kulpning än vad gråjärn gör, i form av större plastisk deformation och tryckrestspänningar under ytan. Alla behandlingar med kulpning som har studerats i det aktuella projektet (konventionella, med ultraljud hos Sonats i Frankrike, försök vid universitetet i Clausthal, Tyskland) kan inducera relativt höga ytnära tryckrestspänningar. Även en kylkanal på ett Scania cylinderhuvud kulpenades och testades i en komponentprovrigg. Tyvärr var antalet prov litet på grund av begränsad

provningskapacitet. Baserat på de totalt sex cylinderhuvudena som provades kan inga definitiva slutsatser dras om varken vilka positiva eller negativa effekter som kulpning har på utmattningshållfastheten.

Undersökningarna som genomfördes i projektet visade att röntgendiffraktion är den bästa tillgängliga metoden att bestämma restspänningstillstånd nära ytan.

Restspänningsmätningar med neutrondiffraktion (ND) som gjordes vid Paul Scherrer-institutet (PSI) i Schweiz på spänningsharpkor från Volvo visade en kvalitativ överensstämmelse med FE-simuleringar.

Projektet har framgångsrikt visat att det är möjligt att öka utmattningshållfastheten hos gjutjärn betydligt genom optimering av restspänningar. Huvudmålet för projektet, ökning av utmattningshållfastheten med 20 %, uppnåddes för provstavar av kompaktgrafitjärn med gjuthud och för gråjärn i maskinbearbetat tillstånd. Projektet har gett upphov till mycket ny kunskap om korrelationerna mellan utmattningshållfasthet, grafitmorfologi, restspänningar och ytkvalitet hos gjutjärn. Även det faktum att utmattningshållfasthet i axiell belastning kan *minska* betydligt genom kraftig kulpning är ytterst intressant och ger värdefulla ingångsdata för undersökningar av effekterna av renblästring.

Resultaten av projektet har presenterats både i vetenskapliga tidskrifter och konferenskrifter samt vid interna seminarier, både vid Scania och Volvo.

Licenciatavhandlingen ”*Residual Stresses and Fatigue of Shot Peened Cast Iron*”, som innehåller forskningsarbetet som genomfördes i projektet, presenterades vid LiU i november 2013.

Ansökan om ett tvåårigt fortsättningsprojekt har lämnats och beviljats för vidare undersökningar inom området, speciellt den kortvariga värmebehandlingen efter kulpning, och undersökningar av den befintliga renblästringsprocessen erbjuder lovande sätt att förbättra utmattningshållfastheten hos gjutjärn till en låg kostnad.

2. Bakgrund

Restspänningar är inre spänningar i materialet utan någon pålagd belastning. Vid utmattningsbelastning kan dessa spänningar ses som medelspänningar som har en betydande effekt på hur material reagerar på utmattning. Dragrestspänningar anses vanligen vara ofördelaktiga med avseende på utmattningshållfastheten eftersom en hög medeldragspänning (*dvs.* dragrestspänning) minskar den användbara dragbelastningsamplituden. Däremot betraktas tryckrestspänningar som fördelaktiga med avseende på utmattningshållfastheten.

Kulpning är en kallbearbetningsprocess vid vilken ytan på en komponent bombarderas med små sfäriska partiklar, kulor. Metoden används allmänt för att öka utmattningshållfastheten hos komponenter av stål, såsom fjädrar och kuggjul. Den gynnsamma effekten av kulpning ligger främst i det inducerade tryckspänningstillståndet och en ökad ythårdhet som uppnås genom kallbearbetningen av ytan. En process som liknar kulpning, renblästring, används allmänt för att rengöra de

gjutna komponenterna från sand osv. Processen är dock inte alls lika kontrollerad som kulpning.

Cylinderhuvuden för tunga lastbilar tillverkas huvudsakligen av gråjärn. Gråjärn uppvisar ett antal positiva fysiska egenskaper, såsom hög termisk konduktivitet och hög dämpningsförmåga. Produkternas komplexitet begränsar också valet av material och tillverkningsmetoder. Nackdelen med användning av gråjärn är den relativt låga hållfastheten.

I takt med att förbränningstrycket i motorer för tunga lastbilar ökar på grund av större krav på motoreffekt, bränsleekonomi och emissioner, ökar också den cykliska belastningen som cylinderhuvudena utsätts för. Ett sätt att möta de ökande kraven skulle kunna vara att optimera cylinderhuvudernas restspänningstillstånd.

Eftersom kulpning används i stor skala för att öka utmattningshållfastheten hos stål, kan metoden också användas för att öka utmattningshållfastheten hos gjutjärn. Dock har man inte i någon större omfattning undersökt kulpning eller restspänningarnas effekt på utmattningshållfastheten hos gjutjärn, speciellt hos gråjärn.

Man har utvecklat ett antal experimentella tekniker, inklusive diffraktion, hålbörning, magnetiska och mekaniska sektioneringsmetoder samt ultraljudsmetoder, för analys av restspänningar i konstruktionsmaterial. Bland metoderna är röntgendiffraktion (XRD) och hålbörning de två mest väletablerade och populära teknikerna som används inom industrin. XRD-mätning av restspänningar i gjutjärn är inte okomplicerad främst på grund av de ganska inhomogena mikrostrukturerna med stora korn och grafitinneslutningar samt varierande elastiska egenskaper.

De på senare tid etablerade teknikerna neutrondiffraktion och synkrotrondiffraktion (röntgenstrålar med hög energi) kan betraktas som jämförelse-/verifieringsmetod för röntgendiffraktion. Utmärkande fördelar jämfört med konventionell röntgenstrålning är stort inträngningsdjup i metaller, vilket tillåter icke-förstörande mätningar av restspänningarnas djupprofiler. De kan därför användas för analys, t.ex. av termiskt orsakade restspänningar i gjutjärn. I likhet med röntgendiffraktion måste man vidta förebyggande åtgärder för att minimera osäkerheter i det uppmätta spänningvärdet när metoderna tillämpas på material med inhomogen mikrostruktur. Det finns ett antal synkrotron- och neutronanläggningar för analys av restspänningar i Europa, och många av dem är öppna för användare från EU-länder. I detta projekt genomförs mätningar med neutrondiffraktion vid Paul Scherrer-institutet i Schweiz.

Målet med forskningsprojektet är att öka utmattningshållfastheten hos gjutjärnskomponenter som används i tunga fordon, genom optimering av restspänningstillståndet. Tyngdpunkten ligger på materialet som för närvarande används i cylinderhuvuden, *dvs.* gråjärn, men även kompaktgråjärn studeras. Man undersöker medel att inducera fördelaktiga restspänningar, och fastställer korrelationen mellan restspänningstillstånd och utmattningsbeständighet under relevanta belastningstillstånd.

3. Syfte

Projektets främsta mål har varit att öka utmattningshållfastheten hos gjutjärnskomponenter med 20 % genom optimering av restspänningar. Detta behövs för att möta de kontinuerligt stigande kraven som ställs på gjutjärnskomponenter i tunga lastbilar. Optimering av restspänningar inkluderar utveckling av olika typer av ytbehandlingsmetoder som inducerar fördelaktiga restspänningar. Dessa ytbehandlingsmetoder skulle också kunna minska spridningen i utmattningshållfastheten.

Mätningen av restspänningar i inhomogena material som gjutjärn är inte okomplicerad, och därför bör man utveckla mer tillförlitliga metoder. Önskvärt är också ökad förståelse av korrelationen mellan restspänningar i och utmattningshållfastheten hos gjutna komponenter såväl som förståelse och kompetens inom området restspänningar i inhomogena material, speciellt i gjutmaterial.

4. Genomförande

Projektet har genomförts i ett samarbete mellan avdelningen för Konstruktionsmaterial vid Linköpings universitet, Volvo Group Trucks Technology och Scania CV AB, under tidsperioden från 1 januari 2011 till 31 december 2013. Doktoranden Mattias Lundberg har varit ansvarig för det mesta av det operativa arbetet vid LiU, under handledning av bitr. professor Ru Lin Peng. En arbetsgrupp bestående av de ovannämnda personerna och representanter för Volvo (Maqsood Ahmad) och Scania (Taina Vuoristo och Daniel Bäckström).

Linköpings universitet har varit ansvarigt för det mesta av det teoretiska och praktiska arbetet med avseende på uppbyggnad och mätning av restspänningar i provobjekt och komponenter av gjutjärn. Restspänningarna i provobjekten från kulpeningsproven uppmättes med hjälp av röntgendiffraktometrarna vid LiU. Därvid ingick också mätningar på provobjekt som testades med avseende på utmattning. LiU initierade ett samarbete med Paul Scherrer-institutet i Schweiz och genomförde mätningar både på spänningsharpor och cylinderhuvuden med hjälp av neutrodiffractionsteknik. Utmattningsprovstaverna har undersökts vid LiU med användning av svepelektronmikroskopi (SEM) med diffraktion av tillbakaspridda elektroner (EBSD) för att analysera effekten av kulpening på ytdeformation hos de två typerna av gjutjärn. LiU, med hjälp av andra partner, har varit ansvarigt för att skriva artiklarna och konferenspresentationerna som har publicerats i projektet.

Volvo och Scania bidrog genom leverans av provobjekt och komponenter för kulpening och utmattningsprov. De assisterade också vid utvecklingen av parametrarna för kulpening och hittade leverantörerna för de olika ytbehandlingarna. Volvo initierade ett samarbete med universitetet i Clausthal, som gjorde att antal kulpeningsprov. Scania genomförde några kulpeningsprov med ultraljud vid Sonats i Frankrike, men de flesta kulpeningsproven gjordes vid Ytstruktur AB i Arboga.

Utmattningsproven för de ytbehandlade provobjekten genomfördes av Volvo och Scania. Resultaten av utmattningsproven analyserades också av respektive företag. Provning av cylinderhuvuden som hade kulpenats inuti en kylkanal genomfördes vid Scania. Volvo genomförde gjutningssimuleringar på spänningsharpor för jämförelser med experimentella restspänningsdata från neutrodiffraktionsmätningar, och Scania levererade material och genomförde gjutningssimuleringar för liknande tester på cylinderhuvuden.

Resultaten av arbetet som utfördes av LiU, Volvo och Scania diskuterades i telefonmöten och andra möten med arbetsgruppen. En styrgrupp bestående av representanter för alla tre parterna övervakade och kommenterade arbetets framåtskridande.

5. Resultat

Innan projektet startades kunde man endast hitta några få litteraturreferenser med avseende på vilken gynnsam effekt kulpening har på utmattningshållfastheten hos gjutjärn, särskilt gråjärn. Därför fanns det en risk att kulpening och liknande ytbehandlingar inte skulle ge någon positiv effekt på utmattningsegenskaperna. Projektet har dock framgångsrikt visat att det är möjligt att betydligt öka utmattningshållfastheten hos gjutjärn genom optimering av restspänningarna.

Huvudmålet för projektet, ökning av utmattningshållfastheten med 20 %, uppnåddes för provobjekt i kompaktgrafitjärn med gjuthud och för gråjärn i maskinbearbetat tillstånd. På grund av en begränsad mängd testdata kunde vi emellertid inte styrka att samma ökning av utmattningshållfastheten kan åstadkommas på cylinderhuvuden genom kulpening inuti en kylvattenkanal.

Under projektets gång har projektparterna förvärvat ytterst värdefull kunskap om effekterna av restspänningar, ytkvalitet och grafitmorfologi när det gäller utmattningsbeteende hos gjutjärn. Till exempel fann man att kraftig kulpening kombinerad med axiell belastning kunde betydligt *minska* utmattningshållfastheten hos gjutjärn.

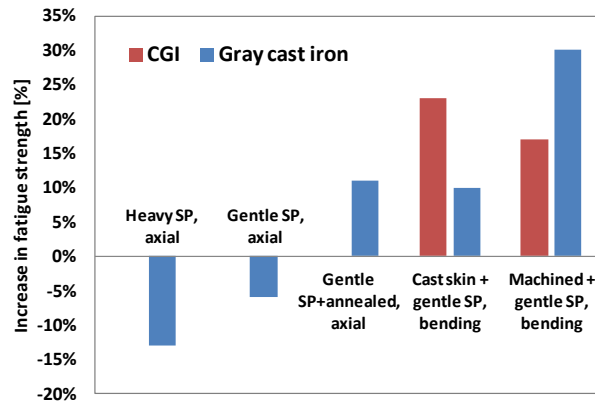
Projektet har resulterat i nio vetenskapliga publikationer (se 6.2) i vilka projektresultaten finns rapporterade.

Nedan presenteras några av projektets huvudresultat kortfattat.

Ökning av utmattningshållfastheten

Resultaten från utmattningsproven som genomfördes med axiell belastning vid Volvo och med böjning vid Scania finns sammanfattade i figur 1. Den resulterande ökningen är i hög grad beroende av kulpeningsmetoden (kraftig resp. varsam), referenstillståndet (maskinbearbetat resp. gjutet) och typen av belastning (axiell resp. böjande). Varsam kulpening ökar utmattningshållfastheten avseende *böjning* med minst 20 % och 10 % för CGI respektive gråjärn. Varsam kulpening kombinerad med kortvarig glödning vid en relativt låg temperatur (285°C) ökar den *axiella* utmattningshållfastheten hos anvisade provstavar av gråjärn med cirka 10 %. Kraftig kulpening *minskar den axiella*

utmattningshållfastheten hos både släta och anvisade provstavar med cirka 20 % [publ. 1, 4]. Som visas i figur 1 reagerar CGI något bättre på kulpning än vad gjutjärn gör, i form av större plastisk deformation och tryckrestspänningar under ytan, vilket leder till högre utmattningshållfasthet.



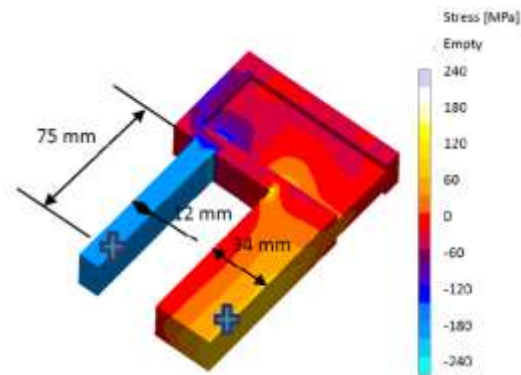
Figur 1. Sammanfattning av effekten av kulpning på utmattningshållfastheten hos provobjekt av gjutjärn och CGI (kompaktgrafitjärn) vid axiell och böjande belastning.

Mot slutet av projektet kulpnades en kylkanal inuti ett Scania cylinderhuvud framgångsrikt med samma parametrar som gav de bästa resultaten vid böjutmattning. Olyckligtvis, begränsades möjligheterna att testa dessa cylinderhuvuden i en provrigg som korresponderar med belastningarna i lastbilmotorer. Baserat på de totalt sex cylinderhuvudena som provades kan inga definitiva slutsatser dras om varken positiva eller negativa effekter av kulpning på utmattningshållfastheten.

Snabba och tillförlitliga metoder att mäta restspänningar

Erfarenheterna från projektet visade att röntgendiffraktion är den bästa tillgängliga metoden att bestämma restspänningstillstånd nära ytan. In-situ experiment med röntgendiffraktion avslöjade att de röntgenelastiskakonstanterna som behövs för en exakt restspänningsanalys är både material- och belastningsberoende [publ. 6].

Restspänningarna i en spänningsharpa direkt från gjutning och en avspänningsglödgad spänningsharpa analyserades med hjälp av finit elementmodellering (figur 2), och resultaten jämfördes med mätningar utförda med neutrodiffraction och hålbörning. Neutrodiffractionsmätningarna genomfördes vid Paul Scherrer-institutet (PSI) i Schweiz. För harpan direkt från gjutning konstaterade man en god överensstämmelse mellan simuleringen och neutrodiffractionsmätningarna i normal- och tvärriktningarna med låga restspänningar. Diskrepans uppträder i axialriktningen och särskilt för sidostavarna för vilka simuleringarna visar mycket högre tryckrestspänningar. Alla tre metoderna ger låga restspänningar i den glödgade harpan [publ. 9]. För de neutrodiffractionsuppmätta cylinderhuvudena från Scania var överensstämmelsen med gjutningssimuleringar ganska tveksam.



Figur 2. Simulerad axiell restspänningsfördelning i spänningsharpor direkt från gjutning.

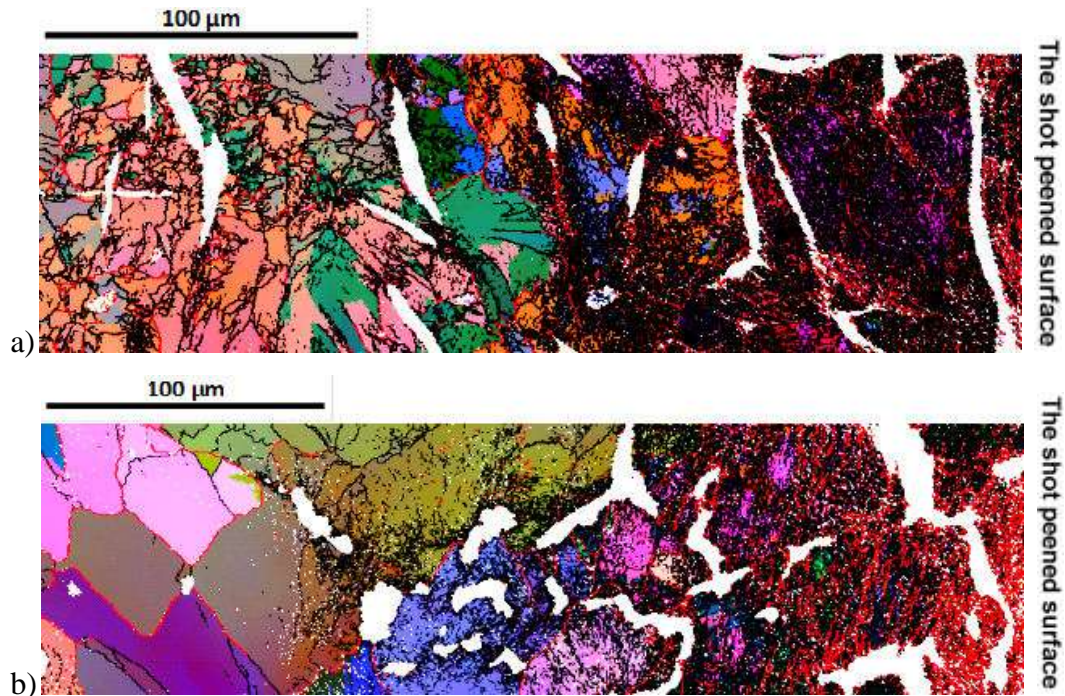
Metoder att förutsäga och inducera gynnsamma restspänningar

Alla kulpningsbehandlingar som studerades i det aktuella projektet (konventionella, med ultraljud vid Sonats i Frankrike, försök vid universitetet i Clausthal) kan inducera relativt höga tryckrestspänningar i ytan på gjutjärn. Stora testserier med konventionell kulpning visade att de högsta ytrestspänningarna inducerades vid pening med det minsta mediet, låg intensitet och 100 % peningstäckning. Lägsta ytliga spänningarna erhöles med de kraftigaste parametrarna. Kulpning med högre intensitet ökade kraftigt tryckrestspänningarnas djup och magnitud [publ. 1, 2].

Två typer av material, gråjärn (LGI) och kompaktgrafitjärn (CGI), undersöktes i projektet. Såväl utmattningsprov, mätning av restspänningar och mikrostrukturanalyser visade att CGI reagerar bättre på kulpning än LGI, i form av större plastisk deformation, högre tryckrestspänningar och större ökning av utmattningshållfastheten. Den bättre responsen hos CGI förklaras av skillnader i grafitmorfologi och matrisens förmåga till plastisk deformation. Effekterna av mikrostruktur och morfologi undersöktes med användning av diffraktion av tillbakaspridda elektroner (EBSD) och ett exempel på visualisering av den plastiska deformationen i form av ökad täthet av korngränser med små och stora vinklar orsakade av kulpning i ytskikten hos de två materialen visas i figur 3 [publ. 1, 3].

Bättre förståelse av korrelationen mellan restspänningar och utmattningsbeständighet i gjutna komponenter

Undersökningarna som utfördes av LiU på kulpnade och utmattningsprovade provobjekt har lett till en djupare förståelse av beroenden mellan restspänningar, ytkvalitet (t.ex. gjuten resp. maskinbearbetad) och utmattningshållfasthet [publ. 1, 4, 5].



Figur 3. Ökad täthet av korngränser med små (low angle grain boundary, LAGB) och stora (high angle grain boundary, HAGB) vinklar nära ytan av LGI och CGI vid kulpening visas som svarta (LAGB) och röda (HAGB) streck.

5.1 Bidrag till FFI-mål

Projektet har på många sätt bidragit till målen för både FFI-programmet ”Fordonsutveckling” och till underprogrammet ”Material för effektivare fordon”.

Projektet har lett till ett nära och fruktsamt samarbete mellan avdelningen för Konstruktionsmaterial vid LiU, Scania och Volvo Group Trucks Technology. Dessutom har projektet innefattat nära samarbete med en leverantör till fordonsindustrin i Sverige, Ytstruktur Arboga AB, som tillsammans med projektparterna har utvecklat metoder för kulpening av gjutjärn och gjutjärnskomponenter. Dessa samarbeten stärker forsknings- och innovationskapaciteten i Sverige och bidrar till målet att säkerställa konkurrenskraft och sysselsättning.

Internationellt forsknings-samarbete har också bedrivits frekvent i termer av neutroddiffraktionsmätningar vid PSI i Schweiz, kulpeningsprov och konsultationer i samarbete med universitetet i Clausthal, Tyskland, och ultraljudspening vid Sonats i Frankrike.

Resultaten av projektet bidrar till underprogrammets mål genom att erbjuda metoder att betydligt öka utmattningshållfastheten hos gjutjärn. Speciellt gråjärn är ett ganska billigt material. Med metoder som kulpening kan man undvika kostsamma materialbyten och belastningsvidden för komponenter tillverkade av gjutjärn kan ökas genom att man istället inför kulpening. Sålunda kan de två målen, väsentlig kostnadsminskning och

betydligt bättre materialegenskaper, fullbordas genom användning av metoderna som har undersökts i detta projekt.

6. Spridning och publicering

6.1 Kunskaps- och resultatspridning

Resultaten i projektet har huvudsakligen erhållits för provobjekt som har kulpenats och utmattningsprovats. Resultaten av projektet har ännu inte implementerats direkt, varken i Scantias eller i Volvos produkter.

Det mesta av projektresultaten har rapporterats i offentliga vetenskapliga tidskrifter och i konferenspresentationer. Licentiatavhandlingen ”*Residual Stresses and Fatigue of Shot Peened Cast Iron*” presenterades av Mattias Lundberg vid LiU i november 2013. I syfte att sprida kunskapen som under projektet har förvärvats inom de deltagande industrierna, har interna seminarier och presentationer av projektresultaten getts vid både Scania och Volvo.

6.2 Publikationer

Projektets resultat har publicerats i vetenskapliga tidskrifter och i konferensskrifter. Nedan en komplett lista över publikationer.

1. Mattias Lundberg: *Residual Stresses and Fatigue of Shot Peened Cast Iron*, Licentiate Thesis, Linköpings universitet, 2013.
2. M Lundberg, R L Peng, M Ahmad, T Vuoristo, D Bäckström och S Johansson: *Residual Stresses in Shot peened Grey and Compact Iron*, accepterad för publicering i *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*.
3. M Lundberg, R L Peng, M Ahmad, D Bäckström, T Vuoristo och S Johansson: *Shot Peening Induced Plastic Deformation in Cast Iron*, accepterad för publicering i *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*.
4. M Lundberg, R L Peng, M Ahmad, D Bäckström, T Vuoristo och S Johansson: *Fatigue strength of machined and shot peened grey cast iron*, accepterad för publicering i *Advanced Materials Research*, ska presenteras vid *Fatigue 2014 Melbourne*, Australien, 2–7 mars 2014.
5. M Lundberg, R L Peng, M Ahmad, T Vuoristo, D Bäckström och S Johansson: *Fatigue strength on shot peened compacted graphite iron*, sammandrag lämnat till ICSP12 (internationell konferens om kulpening, 2014)
6. M Lundberg, R L Peng, T Vuoristo, D Bäckström, M Ahmad och S Johansson: *Influence of Microstructure on the XECs of Cast Irons*, sammandrag lämnat till ECRS-9.

7. M Lundberg, R L Peng, M Ahmad, D Bäckström, T Vuoristo och S Johansson: Influence of Shot Peening Parameters on Residual Stresses in Flake and Vermicular Cast Irons, Materials Science Forum, vol. 768–769, sid. 534–541.
8. M Lundberg, R L Peng, M Ahmad, D Bäckström, T Vuoristo och S Johansson: Graphite Morphology's Influence on Shot Peening Results in Cast Irons, The 9th International Conference on Residual Stresses, 2012, Materials Science Forum, vol. 768–769, sid. 542–549.
9. P Schmidt, R L Peng, V Davydov, M Lundberg, M Ahmad, T Vuoristo, D Bäckström och S Johansson: Analysis of Residual Stress in Stress Harps of Grey Iron by Experiment and Simulation, ska presenteras under ECRS-9, 2014.

7. Slutsatser och fortsatt forskning

Projektet har resulterat i ett nära samarbete mellan LiU, Scania och Volvo. Projektets resultat har publicerats i en licentiatavhandling, ett antal internationella vetenskapliga publikationer och vid interna seminarier.

Innan projektet startades kunde man endast hitta mycket få litteraturreferenser med avseende på vilken gynnsam effekt kulpning har på utmattningshållfastheten hos gjutjärn, särskilt gråjärn. Därför fanns det en risk att kulpning och liknande ytbehandlingar inte skulle ge någon positiv effekt på utmattningsegenskaperna. Projektet har dock framgångsrikt visat att det är möjligt att betydligt öka utmattningshållfastheten hos gjutjärn genom optimering av restspänningarna. Huvudresultaten kan sammanfattas:

- Varsam kulpning ökar böjutmattningshållfastheten med minst 20 % och 10 % för CGI respektive gjutjärn.
- Varsam kulpning kombinerad med kortvarig glödning ökar den axiella utmattningshållfastheten för provobjekt av gjutjärn med skåra med cirka 10 %.
- Kraftig kulpning minskar den axiella utmattningshållfastheten för både släta och anvisade provstavar med cirka 20 %.
- Långvarig glödning av kulpenade provobjekt visar liknande utmattningsbeständighet som referensprover, på grund av termisk relaxation av restspänningar.
- CGI reagerar något bättre på kulpning än gråjärn, i form av större plastisk deformation och tryckrestspänningar under ytan.
- Röntgendiffraktion är den bästa tillgängliga metoden att bestämma restspänningstillståndet nära ytan. In situ röntgendiffraktionsmätningar avslöjade att de röntgenelastiska konstanterna som behövs för en noggrann restspänningsanalys är både material- och belastningsberoende.
- Restspänningsmätningar med neutrodiffraction (ND) som gjordes vid Paul Scherrer-institutet (PSI) i Schweiz gjorda på spänningsharpor från Volvo visade en kvalitativ överensstämmelse med FE-simuleringar. För de



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

neutrondiffraktionsuppmätta cylinderhuvudena från Scania var överensstämelsen med gjutningssimuleringar ganska klena.

Tack vare lovande resultat som har erhållits i detta projekt har ett tvåårigt fortsättningsprojekt ansökts och ska sannolikt beviljas för fortsatta undersökningar. Speciellt kortvarig värmebehandling efter kulpning och undersökningar av den befintliga renblåstringsprocessen erbjuder lovande sätt att förbättra utmattningshållfastheten hos gjutjärn till en låg kostnad. Resultaten av fortsättningsprojektet kommer att sammanfattas i en doktorsavhandling.

8. Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektet har genomförts i ett samarbete mellan avdelningen för Konstruktionsmaterial vid Linköpings universitet, Scania CV AB och Volvo Group Trucks Technology. Kontaktpersonerna är:

Linköpings Universitet, avdelningen för Konstruktionsmaterial:
Biträdande professor Ru Lin Peng, ru.peng@liu.se
Doktorand Mattias Lundberg, mattias.lundberg@liu.se

Scania CV AB, Materialteknik:
Taina Vuoristo, taina.vuoristo@scania.com (projektledare)
Daniel Bäckström, daniel.backstrom@scania.com

Volvo Group Trucks Technology:
Maqsood Ahmad, maqsood.ahmad@volvo.com



FORDONSSTRATEGISK
FORSKNING OCH INNOVATION

Adress: FFI/VINNOVA, 101 58 STOCKHOLM
Besöksadress: VINNOVA, Mäster Samuelsgatan 56, 101 58 STOCKHOLM
Telefon: 08 - 473 30 00
ivss@vv.se