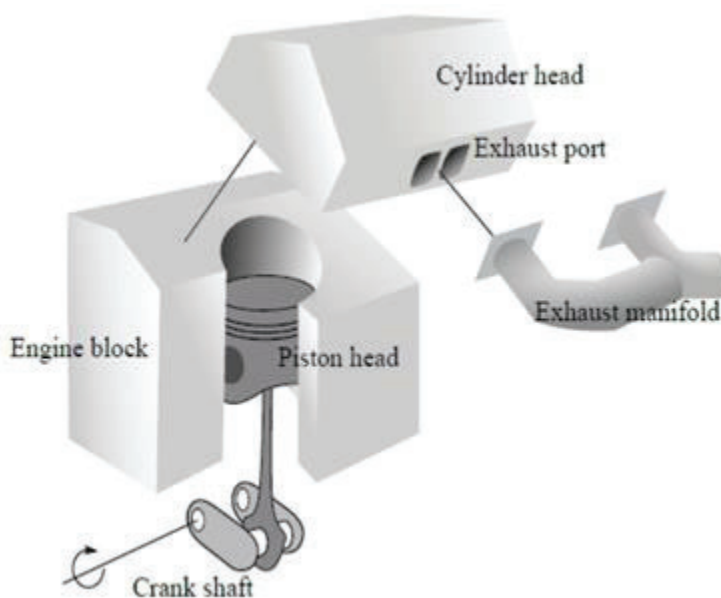


Förbättrad utmattningslivslängd för cylinderhuvuden

Publik rapport



Författare: Peter Skoglund, Viktor Norman, Pål Schmidt
Datum: 2022-01-04
Projekt inom Hållbar produktion

FFI Fordonsstrategisk
Forskning och
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

SCANIA

VOLVO

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary in English.....	4
3 Bakgrund.....	5
4 Syfte, forskningsfrågor och metod	7
5 Mål	8
6 Resultat och måluppfyllelse	8
7 Spridning och publicering	9
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	9
7.2 Publikationer.....	10
8 Slutsatser och fortsatt forskning	11
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	11

Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på www.vinnova.se/ffi.

1 Sammanfattning

Projektet "Förbättrad utmattningslivslängd för cylinderhuvuden" är ett samarbetsprojekt mellan Scania, Volvo Powertrain och Linköpings universitet med finansiering från Vinnova och FFI-programmet Hållbar produktion. Projektets huvudmålsättning är att utveckla en ny gjutjärnslegering lämplig för cylinderhuvuden med förbättrad livslängd vad beträffar termomekanisk utmattning (TMF) och högcykelutmattning (HCF). Detta är viktigt eftersom nya förbättrade förbränningsprocesser samt nya (bio)bränslen kan leda till högre mekaniska och termiska laster på cylinderhuvudet.

Projektet påbörjades i april 2018 och avslutas i december 2021 med en total budget på 6.96 Mkr.

Projektet initierades med en litteraturstudie beträffande gjutjärns mekaniska och termiska egenskaper samt en analys av befintliga mikromekaniska modelleringsansatser för att prediktera dessa egenskaper. Baserat på denna, och tidigare kunskap, gjöts en omfattande testserie av olika kompaktgrafitjärnslegeringar (CGI) med varierande sammansättning och stelningsförhållanden. Legeringarnas mikrostruktur har analyserats och relaterats till statistiska mekaniska egenskaper, utmattningsprestanda och värmeledningsförmåga.

Arbetet har givit förbättrad kunskap om relationen mellan mikrostruktur och materialegenskaper och en modell har utvecklats som kvalitativt kan rangordna gjutjärnslegeringars mekaniska prestanda baserad på kännedom om mikrostrukturella parametrar.

Resultaten visar vidare att en legering av CGI med en tillsats av 4% Si ger ett material med ferritisk matris med samma statistiska hållfasthet och grafitstruktur som ett mera konventionellt perlitiskt CGI material som idag används i olika komponenter. Den nya ferritiska CGI-legeringen har däremot en högcykelutmattningshållfasthet som är ca 10% högre än det perlitiska materialet. Vidare har framkommit att värmeledningsförmågan är ca 4% högre för den ferritiska legeringen. Detta i kombination med övriga mekaniska egenskaper leder till att också den termomekaniska utmattningslivslängden förväntas förbättras något hos ett cylinderhuvud gjutet i den nya legeringen.

Kiselhalten påverkar materialegenskaperna och ökande innehåll höjer den mekaniska hållfastheten och HCF-egenskaperna hos den ferritiska legeringen medan värmeledningsförmågan minskar. Mängden kisel kan med andra ord användas för att delvis styra materialegenskaperna till önskade värden beroende på lastsituationen. Det föreslås därför att en noggrann genomgång av vilka egenskaper som krävs för att uppfylla livslängdskraven för cylinderhuvudets lastfall görs. Resultaten från detta projekt kan därefter användas för att välja en lämplig testlegering. I ett nästa steg rekommenderas att cylinderhuvuden gjuts i denna legering för fullskaliga motorprov och också för att vidare studera legeringens gjutbarhet och bearbetningsegenskaper.

2 Executive summary in English

The project "Improved fatigue performance of cylinder heads" is a cooperation between Scania, Volvo Powertrain and Linköping University with funding from Vinnova and the FFI programme sustainable production. The main purpose of the project is to suggest a new cast iron alloy with improved lifetime compared to the one used today when subjected to thermomechanical- (TMF) and high cycle fatigue (HCF) loads relevant for cylinder heads. This is important since new improved combustion processes as well as new (bio)fuels may lead to higher mechanical and thermal loads on the cylinder heads.

The project was started in April 2018 and ended in December 2021 with a total budget of 6.96 MSEK.

The project was initiated with a literature study concerning the mechanical and thermal properties of cast irons, as well as an analysis of current micromechanical approaches to predict these properties. Based on this and earlier knowledge, a large series of different compacted graphite irons (CGI) was cast. The alloys had different compositions and different solidification- and cooling conditions. The microstructures of the alloys were analysed and related to the mechanical properties, fatigue performance and thermal conductivity.

The work has given an improved knowledge of the relation between microstructure and material properties and a model has been proposed that qualitatively ranks the mechanical performance of cast irons based on the microstructural constituents.

Moreover, the results show that a CGI alloyed with 4% Si will give a ferritic matrix with the same tensile strength and graphite structure as a more conventional pearlitic CGI alloy used in different components today. However, the HCF strength of the ferritic alloy increased with about 10% compared to the pearlitic CGI alloy.

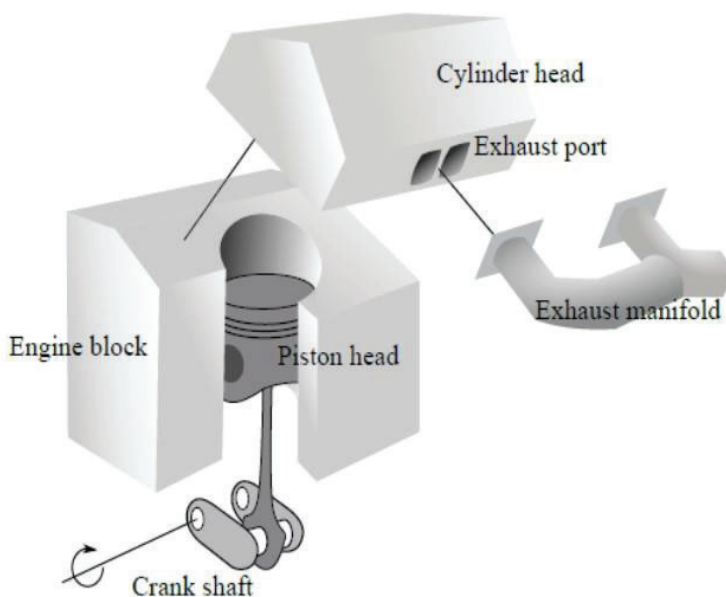
Moreover, the ferritic alloy (4% Si) has a higher thermal conductivity of about 4% compared to the pearlitic alloy with the same tensile strength and a similar graphite morphology. This in combination with the other mechanical properties indicate that also the thermomechanical fatigue life of cylinder heads cast in the new alloy will be slightly improved.

Increasing the silicon content will further increase the static strength as well as the HCF- properties of the ferritic alloy while the thermal conductivity will decrease. Thus, the silicon content can to some extent be adjusted to fit the specific need of material properties depending on the load situation. It is thus recommended that a detailed consideration of the fatigue properties needed to fulfil life requirements for the cylinder head is done. The results from this project could then be used to select a suitable test alloy. In a next step, it is suggested to cast cylinder heads in this alloy for full scale engine experiments, as well as to further study its castability and machinability.

3 Bakgrund

Trots den snabba utvecklingen av elektrifierade fordon och hybridfordon kommer effektiviseringen av förbränningsmotorer avsedda för flera olika typer av (bio)bränslen att vara en mycket viktig del i omställningen till en koldioxidfri lastbilsflotta. Energieffektivare motorer och nya bränslen leder ofta till högre förbränningsstryck och högre temperaturer som i sin tur påverkar belastningen och därmed livslängden hos de olika motorkomponenterna.

Cylinderhuvuden är en vital komponent i en förbränningsmotor och deras funktion och placering gör dem utsatta för både höga temperaturer och mekaniska vibrationer från förbränningspulserna. I figur 1 ses en schematisk översikt av några viktiga motorkomponenter.

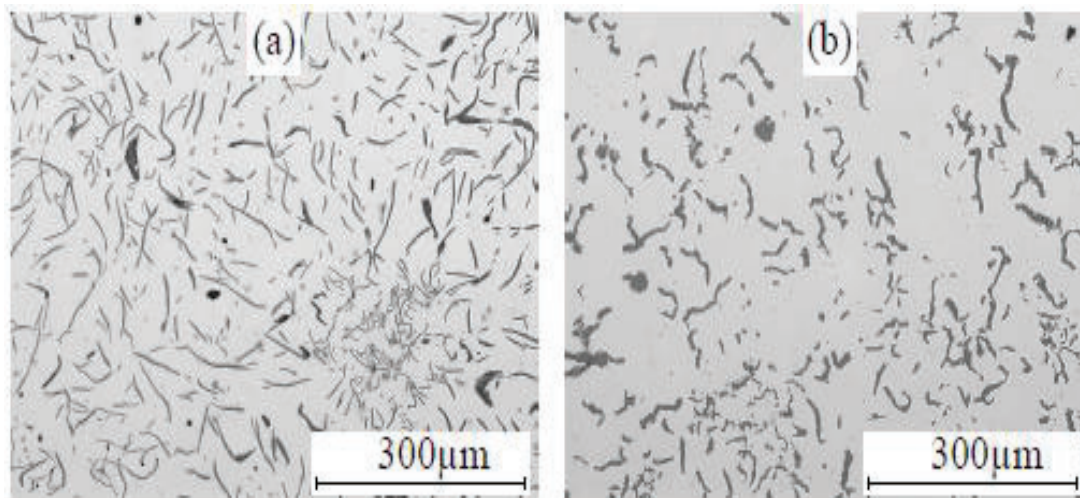


Figur 1. Schematisk översikt av några viktiga motorkomponenter.

Ett viktigt och ofta livslängdsbestämmande belastningsfall är termomekanisk utmattningsfall (TMF). Detta uppstår på grund av de temperaturvariationer som fås när till exempel motorn startas och stängs av eller när motorbelastningen ändras. Dessa temperaturändringar genererar i sin tur cykliska mekaniska laster som påverkar komponentens livslängd. Termomekanisk utmattningsfall kan framför allt ske i cylinderhuvudets förbränningsplan. Ett annat viktigt lastfall som kan begränsa livslängden är högcykelutmattningsfall (HCF). Denna genereras från förbränningspulserna och påverkar ofta materialet i anslutning till cylinderhuvudets kylkanaler.

Cylinderhuvuden för tunga lastbilar framställs vanligen av gråjärn (LGI) eller av kompaktgrafitjärn (CGI). Dessa material består av grafitpartiklar som antingen är spetsiga, lamellformade (LGI) eller mera avrundade och trubbiga (CGI) omgivna av en vanligen perlitisk järnmatris. Formen på grafitpartiklarna är viktig eftersom den påverkar både de mekaniska och de termiska egenskaperna. De mera avlånga och spetsiga grafitpartiklarna i gråjärn leder värme bra men fungerar också som sprickinitieringspunkter och leder till lägre mekaniska egenskaper jämfört med de mera trubbiga grafitpartiklarna i CGI-material (figur 2). Gråjärn har fördelen att det lättare kan gjutas i komplicerade geometrier, har hög värmeledningsförmåga, goda

dämpningsegenskaper och är relativt billigt. Kompaktgrafitjärn har högre hållfasthet men har lägre värmeledningsförmåga och är något mer komplicerad att gjuta.



Figur 2. Schematisk bild på gråjärn (vänster) och kompaktgrafitjärn (höger).

För gjutna material och komponenter, som cylinderhuvudet, är inte bara den kemiska sammansättningen viktig utan även svalnings- och stelningsförhållandena under gjutningen eftersom de har stor påverkan på mikrostrukturen och de mekaniska egenskaperna. En snabb stelning leder till en finare mikrostruktur och därmed till högre mekaniska egenskaper. En konsekvens av detta är att gjutna material sällan eller aldrig har homogena materialegenskaper. I stället varierar dessa beroende på att materialets tjocklek och andra gjutparametrar ger olika stelningsförhållanden i olika delar av komponenten.

Den matris som omsluter grafitpartiklarna i LGI- och CGI legeringar är vanligen perlitisk med hög hårdhet men låg duktilitet. I andra typer av gjutjärn förekommer ofta andra järnmatriser. En ferritisk matris har till exempel lägre hårdhet men högre duktilitet vilket kan vara en fördel i vissa tillämpningar. Vilken matris som fås beror på kemisk sammansättning, stelnings- och svalningsförhållanden samt eventuella efterföljande värmebehandlingar.

Det framgår att gjutparametrar såsom kemisk sammansättning, stelningsprocess och värmebehandling är viktiga för den resulterande mikrostrukturen och därmed för komponentens prestanda. En stor del av arbetet i detta projekt har bestått av att karakterisera CGI-legeringar med kiselhärdad ferritisk matris med avseende på mikrostruktur och utmattningsprestanda.

4 Syfte, forskningsfrågor och metod

I linje med de allmänna målen för FFI-programmet förväntas det föreslagna projektet resultera i minskad miljöpåverkan från tunga fordon genom att avsevärt öka effektiviteten hos förbränningsmotorn. Detta ska göras genom att föreslå en ny legering för cylinderhuvuden som tillåter att både förbränningstryck och temperatur ökar samtidigt som livslängden förlängs. En konsekvens av detta är att bränsleförbrukningen minskar och att underhållsintervallen förlängs.

Tidigare studier har indikerat att kisellegerade ferritiska kompaktgrafitlegeringar kan ge förbättrade mekaniska egenskaper jämfört med dagens cylinderhuvudmaterial. Det är vidare känt att de mekaniska egenskaperna hos perlitiska LGI- och CGI material kan påverkas genom att tillsätta små mängder av andra legeringsämnen som till exempel molybden. Det är därför av intresse att undersöka om en liknande effekt fås på CGI-legeringar med ferritisk matris. Ett annat viktigt mål var att utveckla en materialmodell som baserad på mikrostrukturen kvalitativt kan prediktera livslängden hos gjutjärn med olika matriser och olika grafitstrukturer.

Viktiga forskningsfrågor att utvärdera är därför:

- Hur påverkar kiselhalten mikrostrukturen samt de mekaniska och termiska egenskaperna hos legeringar av kompaktgrafitjärn?
- Hur påverkar legeringstillsetser som molybden och nickel de mekaniska och termiska egenskaperna hos kisellegerade kompaktgrafitjärn?
- Hur påverkar stelnings- och svalningshastigheten de mekaniska och termiska egenskaperna hos kisellegerade kompaktgrafitjärn?
- Vilka mikrostrukturella egenskaper är viktigast för utmattningsprestandan hos legeringar avsedda för cylinderhuvuden?

I ett första steg genomfördes en litteraturstudie beträffande mekaniska och termiska egenskaper för olika gjutjärnslegeringar som kan vara lämpliga för cylinderhuvuden. Baserat på resultatet av denna så gjöts en omfattande testserie bestående av 4 perlitiska och 5 ferritiska (kiselhärdade) sammansättningar av kompaktgrafitjärn. Dessa 9 legeringar gjöts i form av plattor med 4 olika stelnings- och svalningshastigheter vilket resulterade i material med 36 olika mikrostrukturer.

Efter initiala studier av mikrostruktur och statiska mekaniska egenskaper valdes några av de mest intressanta legeringarna ut för mera omfattande utmattningsprovning och analys. Några av de legeringar som används i cylinderhuvuden i dag användes som referensmaterial.

För att utvärdera samlingen av potentiella legeringar användes omfattande mekaniska och metallografiska utvärderingsmetoder, nämligen högcykelutmattningsprovning, termomekanisk provning, spricktillväxtprovning och brottseghetsprovning, samt optisk mikroskopi, bildanalys av grafitmorfologi, mikrohardhetsprovning, svepelektronmikroskopi och elektronmikroprob-analys. I syftet att utreda effekten av legeringselement upprättades även mikromekaniska modeller baserat på finita elementmetoden. I synnerhet utvärderades effekten av grafitmorfologin och matrisens hållfasthet på utfallet i den termomekanisk utmattningsprovningen.

5 Mål

Projektets förväntades sammanfattningsvis leverera följande resultat:

- En ny legering avsedd för cylinderhuvuden med förlängd livslängd ska presenteras.
- Materialen ska karakteriseras med avseende på mikrostruktur, statiska mekaniska egenskaper och utmattningsprestanda. Detta inkluderar både grafit- och matrisstrukturen samt termomekanisk- och högcykelutmattning under förhållanden relevanta för cylinderhuvuden.
- En förbättrad förståelse för hur mikrostrukturen, det vill säga matris- och grafitstrukturen, relaterar till utmattningsprestandan.
- En mikromekanisk modell som kvalitativt kan användas för att rangordna olika gjutjärn med avseende på utmattningsprestanda ska presenteras.
- En akademisk licentiatexamen ska presenteras baserad på de vetenskapliga resultaten från projektet.

6 Resultat och måluppfyllelse

De genomförda experimenten tyder på att kiselhärdade ferritiska legeringar av kompaktgrafitjärn har potential som material för cylinderhuvuden. En ferritisk CGI-legering som utvecklats med 4.0% Si har samma statiska hållfasthet och samma grafitstruktur som typiska perlitiska CGI-legeringar lämpliga för cylinderhuvuden men dess högcykelutmattningshållfasthet är ca 10% högre. Den ferritiska legeringen har dessutom ca 4% högre värmeledning än den perlitiska vilket tillsammans med övriga materialegenskaper förväntas leda till något förbättrad termomekanisk prestanda och livslängd för cylinderhuvudet.

Det har också framkommit att de mekaniska egenskaperna hos de undersökta ferritiska CGI-legeringarna är tydligt beroende av kiselhalten. En högre kiselhalt ökar hårdheten, den statiska hållfastheten och utmattningsegenskaperna medan däremot värmeledningsförmågan minskar. Resultaten från projektet gör det möjligt att i viss mån styra materialegenskaperna till önskade värden genom att variera kiselhalten. För de ferritiska CGI-legeringarna har vidare en tillsats av molybden visat sig förbättra de termomekaniska utmattningsegenskaperna medan resultaten inte är lika tydliga vad beträffar effekten på högcykelutmattningshållfastheten. Projektet har också klart visat att hög stelningshastighet inverkar på mikrostrukturen och att de mekaniska materialegenskaperna förbättras med snabb stelning.

De genomförda analyserna har också använts för att relatera mikrostrukturella storheter som grafitmorfologi och matrisstruktur till de mekaniska egenskaperna såsom utmattningsprestanda. Resultaten har bland annat använts till att utveckla en mikromekanisk modell som kan användas för att kvalitativt rangordna material med avseende på mekanisk prestanda vid termomekaniska lastfall, både gällande hållfasthet och utmattninglivslängd. Den mikromekaniska modellen uppvisar god anpassning mot de erhållna resultaten, samt ger en uppskattning för inverkan på utmattningsprestandan då hypotetiska variationer i grafitmorfologin och matrishållfastheten genomförs. Modellen är baserad på mätbara parametrar i mikrostrukturen och har därför ett brett användningsområde och möjligheten att tillämpas på andra typer av gjutjärn eftersom materialens verkliga mikrostruktur, och de fysiska skadeförlopp som förväntas ske, är explicit representerade i modellen.

En ny metod för att mer tillförlitligt utvärdera grafitmorfologin med bildanalys har även tagits fram och presenterats. I jämförelse med konventionella mättningsprocedurer ger den nya metoden avsevärt lägre mätspridning med avseende på de variationer som uppkommer då mikroskopinställningar inte alltid är desamma.

Projektet har därmed framgångsrikt uppfyllt de tekniska mål som planerades. På grund av långvarig sjukdom har dock inte en licentiatexamen färdigställts. Detta planeras att göras i ett senare skede.

De uppfyllda tekniska projektmålen som innebär höjd utmattningshållfasthet och längre livslängd leder till att högre förbränningstryck- och temperatur kan tillämpas. Detta leder i sin tur leder till en effektivare förbränning, lägre bränsleförbrukning och därmed minskad miljöpåverkan. En annan viktig aspekt är att förbättrade mekaniska och termiska egenskaper möjliggör andra designlösningar. Det kan till exempel ge lättare komponenter med tunnare väggar som kan leda till bättre kylning och därmed indirekt till effektivare förbränningsprocesser.

En god kännedom om processparametrars inflytande på mikrostruktur och mekaniska egenskaper innebär också en snabbare produktutveckling och även färre kassationer i den löpande produktionen vilket ökar konkurrenskraften.

Slutligen har arbetet ytterligare förstärkt det pågående samarbetet mellan Scania, Volvo Powertrain och Linköpings universitet och fortsatta gemensamma projekt mellan parterna planeras.

7 Spridning och publicering

7.1 Kunskaps- och resultatsspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	Kunskapen om korrelationen mellan gjutjärns grafit- och matrisstruktur och dess mekaniska och termiska egenskaper har väsentligt förbättrats.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	Baserat på resultaten av detta projekt görs kompletterande försök för att ge ytterligare underlag inför beslut om eventuella fullskaliga komponentgjutningar.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	Beror på resultatet av de kompletterande försök som ska göras i interna fortsättningsprojekt, se ovan.
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/ tillståndsärenden/ politiska beslut		

7.2 Publikationer

Inom ramen för projektet har följande öppna dokument publicerats.

Granskade artiklar:

- [1] E. Kihlberg, V. Norman, P. Skoglund, P. Schmidt and J. Moverare, "On the correlation between microstructural parameters and the thermo-mechanical fatigue performance of cast iron", *Int. J. of Fatigue*, Vol. 145, April 2021. (<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106112>).
- [2] V. Norman, "Micromechanical assessment of the influence of graphite morphology and matrix constitutive behaviour on the thermo-mechanical fatigue of ferritic and pearlitic compacted graphite iron", In preparation.

Konferensbidrag:

- [1] E. Kihlberg, V. Norman, M. König, P. Schmidt, "Evaluation of the ISO standards for graphite analysis of compacted graphite iron", Oral presentation at Euromat 1-5 September, Stockholm, Sweden, 2019.
- [2] E. Kihlberg, V. Norman, P. Skoglund, P. Schmidt and J. Moverare, "Investigation of microstructure parameters and thermo-mechanical fatigue performance of pearlitic and ferritic compacted graphite cast iron", Oral presentation at 4th International workshop on Thermo-Mechanical Fatigue, November 13th-15th Berlin, Germany, 2019.

Magister- och kandidatuppsatser:

- [1] L. Gonzalez, "Influence of matrix and alloying on the fatigue crack propagation and fracture toughness of compacted graphite iron for cylinder heads", Master thesis, Linköping University, Engineering Materials, LIU-IEI/LITH-EX-A—2020, Scania report 7069534, 2020.
- [2] E. From, "Influence of matrix and alloying on the high cycle fatigue properties of compacted graphite iron for cylinder heads", Master thesis, Mechanical Engineering, 30 Credits, KTH Royal Institute of Technology, School of Engineering Sciences", 2020, Scania report 7068064.
- [3] A. Boman, H. Jybrink and E. Norberg, "Den kemiska sammansättningens påverkan på mikrostrukturen – En analys av legeringsämnens betydelse för mikrostrukturen i kompaktgratitjärn", Kandidatuppsats, LIU-IEI-TEK-G-20/01785, 2020, Scania report 7068733, 2020.
- [4] J. Ahlsén, H. Titus and J. Wrangstål, "En jämförelse av mikrostruktur och mekaniska egenskaper för kompaktgratitjärn", Kandidatuppsats, LIU-IEI-TEK-G-20/01728, 2020, Scania report 7068735, 2020.
- [5] F. Lundström, "Development and implementation of a constitutive model of cast iron in a user-defined material model in ABAQUS/CAE" Master thesis, Linköping university, Engineering materials, ISBN: LIU-IEI-TEK-A—20/03643—SE 2019

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Ur en allmän synvinkel har projektet lett till ett väl fungerande samarbete mellan grupperna vid Scania, Volvo och Linköpings universitet och parterna är involverade i ett nytt Vinnovafinansierat projekt inom gjutjärnsområdet.

De tekniska projektresultaten visar tydligt att kiselhärdade ferritiska CGI-legeringar har potential som material för framtida cylinderhuvuden med effektivare förbränning och lägre bränsleförbrukning som följd. De mekaniska- och termiska egenskaperna kan i viss mån styras till önskvärda nivåer genom att variera kiselhalten.

Det rekommenderas att fortsatt forskning fokuserar på fullskaliga gjutningar av cylinderhuvuden för motorprov och för att vidare studera de nya materialens gjutbarhet i mer komplicerade geometrier och även dess bearbetningsegenskaper. Resultaten från det nu genomförda projektet bör användas för att ta fram en lämplig testlegering för dessa fullskaliga testgjutningar.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Projektet har drivits av Scania CV AB, Volvo Powertrain och avdelningen för konstruktionsmaterial vid Linköpings universitet.

Kontaktpersoner:

Linköpings universitet
Viktor Norman
viktor.norman@liu.se

Volvo Powertrain
pal.schmidt@volvo.com

Scania CV AB
Peter Skoglund (projektledare)
peter.skoglund@scania.com