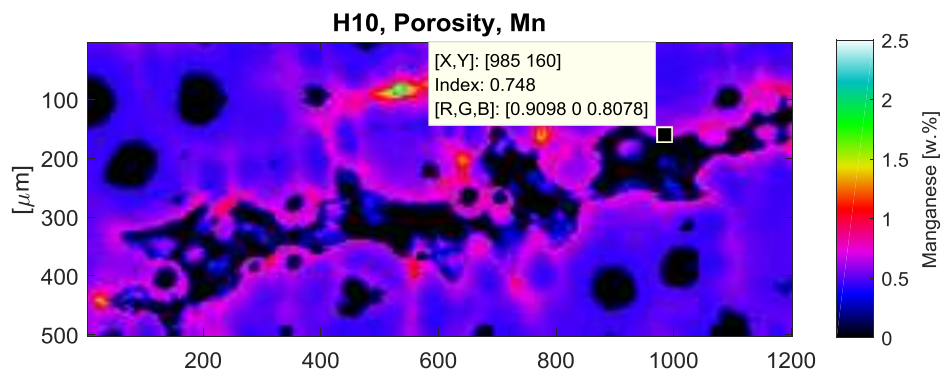


Slutrapport för SPOFIC II

2013-04720



Jessica Elfsberg
2017-04-04
Fordonsutveckling

Innehållsförteckning

1 Sammanfattning	3
2 Executive summary	4
2.1 Background	4
2.2 Purpose, research questions and methods	4
2.3 Aim	4
2.4 Results	5
2.5 Fulfilment of aims	6
3 Bakgrund.....	7
4 Syfte, frågeställningar och metod.....	7
5 Mål	9
6 Resultat och måluppfyllelse	9
6.1 Resultat Del A. Teoretisk modell.....	9
6.2 Resultat Del B. Studie av stelning, volymförändringar samt prediktering av krympbenägenhet med UTA och dilatometer	14
6.3 Del C. Beräkning av stelningsfenomen och fenomen i samband med bildning av krympporositet.....	16
6.4 Del D. Industriförsök med varierande produktionsparametrar	17
6.5 Måluppfyllelse.....	19
7 Spridning och publicering	20
7.1 Kunskaps- och resultatspridning	20
7.2 Publikationer.....	20
7.3 Omvärldsbevakning	22
8 Slutsatser och fortsatt forskning	24
9 Deltagande parter och kontaktpersoner.....	25

1 Sammanfattning

Projektet SPOFIC II har fördjupat sig i kompaktgrafitjärnets (CGI) stelningmekanismer och bildningen av krympopor. Det slutgiltiga målet, eller visionen, med projektet är att undvika bildning av krympoporositeter som försämrar materialets egenskaper eller stör komponentens funktion. För att nå dit krävs fördjupad kunskap om stelningförloppet och krymporsbildningen, förbättrade simuleringar och en styr- och kontrollmetod. Även om det slutgiltiga målet ännu inte är uppnått har projektet bidragit med mycket viktig kunskap och metodutveckling.

De viktigaste resultaten:

- Utveckling av en repeterbar metod, i laboratorieskala, för en stabil produktion av kompaktgrafitjärn utan direktkontroll av smältan. Metoden möjliggör komplexa stelningsstudier.
- En ny etsningsmetod minskar tidsåtgången samt ökar noggrannheten för karakterisering av primär austenit i släckt gjutjärn.
- Segringsanalyser baserat på EPMA (Electron Probe Micro Analysis) har använts till en invers simuleringsmodell som för första gången visualiserar en tvådimensionell dynamisk tillväxt av den stelnade fasen. Samma modell har använts för att prediktera när under stelningförloppet krympopor uppstår i nodulärt gjutjärn och planeras att användas för lamellärt gjutjärn och kompaktgrafitjärn.
- Mätningar av densitetsvariationen i smälta och austenit som funktion av sammansättning möjliggör modellering av stelningförloppet med en väsentligen bättre noggrannhet än tidigare.
- Släckningsexperiment i laboratorieskala indikerar att nodulär grafit i järnet hamnar i det interdendritiska området vilket tolkas som att den tillhör en sekundär population som skiljs ut mot slutet av stelningförloppet. Utskiljningen av grafitnoder är sannolikt inte orsaken till krympoporositetsbildning utan snarare ett kvitto på att porer har bildats.

Ett mycket omfattande experiment i industriell skala genomfördes. Som förväntat ger olika kombinationer av processparametrar (MGM och MGI) olika benägenhet till porositetsbildning. Variationen var dock inte helt som förväntat. Detta belyser betydelsen av fördjupad kunskap om hur ympning påverkar kärnbildning och krympoporositetsbildning.

Vidare har ett instrument som kombinerar termisk analys mätningar av volymförändringar under stelning och svalning utvecklats och använts. Resultaten indikerar att undertryck råder strax innan starten av eutektisk kärnbildning. Den nya mätmetoden anses vara mycket lämplig för att vidare undersöka inverkan av exempelvis ympmedel på stelningförloppet och benägenhet till krympoporositetsbildning.

Forskningsresultaten har presenterats, eller kommer att presenteras, i sex konferensbidrag, sex vetenskapliga artiklar, ett examensarbete, tre licentiatavhandlingar samt en doktorsavhandling. Dessutom har forskarutförarna besökt de deltagande företagen ett flertal gånger för att presentera forskningsresultat samt diskutera företagets utmaningar. Samarbetet inom projektgruppen har fungerat mycket bra. Även slutrapporten är skriven i nära samarbete mellan projektparterna.

2 Executive summary

2.1 Background

The heavy duty vehicle development requires continuous improvements regarding engine efficiency, decreased vehicle weight and less environmental impact from transports. Engine blocks and heads have been cast in lamellar graphite cast iron, but lately the stronger compacted graphite iron (CGI) have become more common than before. The stronger material can save weight but also facilitate higher combustion pressure. Compacted graphite iron is more difficult to cast, and machine, than lamellar cast iron. A very strict control of production parameters are necessary, There are a few commercial available methods on the market. Even when the production parameters are strictly controlled, shrinkage porosities are occasionally found, especially in parts with complex geometries. The porosities decrease the material strength and also allows leakage of oil, coolant or exhaust gases. A successful CGI production will require even better control systems which motivates development of methods. An earlier project SPOFIC was running 2011-2014. The work was mainly based on detailed observations of complex engine parts from real industrial production [1, 2].

2.2 Purpose, research questions and methods

The purpose of the current project, SPOFIC II, was to deepen the knowledge about structure and shrinkage pore formation in solidifying compacted graphite iron. These knowledge should be the base for improved modelling as well as development of control methods for avoiding detrimental defect formation.

The research questions can be formulated:

- How is the shrinkage pore formation influenced by:
 - production parameters in industrial scale?
 - amount of eutectic cells?
 - nodularity in the solidifying CGI-material?
 - segregation pattern in the material?
- How does the density of the iron vary with temperature, state of aggregation and chemical composition?
- How can we in the best way model the solidification and defect formation?

The answers of the questions were searched by parameter studies in an industrial environment as well as accurate experiments in laboratory scale. The project was divided into four parts, A-D.

2.3 Aim

The aim is, in the end, to eliminate porosity formation that decreases the material strength or allows leakage. The aim of the project can be divided into parts:

Part A. Theoretical model

Deeper knowledge about structure formation, especially formation and avoidance of primary and secondary graphite nodule populations.

Part B. Study of solidification, volume changes and prediction of shrinkage tendency by the use of UTA (Expanded Thermal Analysis) and dilatometer

Understanding and prediction of volume and density changes at solidification and cooling of compacted graphite iron. Especially the influence of eutectic cell density.

Part C. Numerical treatment of solidification and shrinkage pore formation

Accomplish and refine modelling of solidification in compacted graphite iron.

Part D. Industrial scale trials

Correlate the tendency of pore formation, microstructure and pore characteristics to the production parameters

Investigate how ultrasonic testing can be used for detecting porosities in CGI parts.

2.4 Results

2.4.1 Part A. Theoretical model

Method for laboratory scale manufacturing of CGI

A reproducible and stable method has been developed for laboratory scale production of compacted graphite iron without direct melt control and treatment. This method makes it possible to do very complex solidification studies. The method is based on remelting ductile iron samples and then keep them above liquidus for a certain time, see Figure 2. Holding times between 50 and 100 minutes results in compacted graphite iron fulfilling the requirements in the international standards [4].

The formation of double population of graphite nodules in compacted graphite iron

The size distribution measured per area was transformed to volumetric distribution. There are two clear populations, see Figure 3. The larger nodules could be correlated to a slight heat generation at a temperature above the eutectic temperature, this leads to the conclusion that the larger nodules are primary precipitated graphite. Longer holding times delayed this heat generation and decreased the size of the primary population. It is not fully understood whether the primary nodules directly influences the pore formation [5].

Microsegregation

EPMA (Electron Probe Micro Analysis), was performed on selected samples of the different iron types (LGI, CGI and SGI). The EPMA results, i.e. local chemical composition, was transformed to local solidification temperatures. For the lamellar graphite iron samples (from the project SPOFIC I), a relatively large deviation from the other iron types were observed. The difference was largest for manganese. %Mn in solid divided by %Mn in liquid was for LGI=0.9 compared to 0.7 for SGI and CGI. This fact may, at least partly, explain the tendency of carbide formation in last solidified regions for CGI and SGI [6]. Shrinkage pores were investigated with EPMA. The composition in the metal matrix close to shrinkage pores was found to be rather homogeneous, see Figure 4. The chemical composition in this region was compared to the chemical composition in a sound region. By connecting the chemical composition to a solidification curve, it could be concluded that the pore was formed when about 71% of the matrix had solidified [7].

Characterisation

During the development of the remelting technique for the making of CGI samples, a new etching technique for solidification structure in quenched cast iron was developed, see Figure 5 [8]. Further on, the EPMA method has been considerably improved regarding for example calibration relevant for cast iron samples [9].

2.4.2 Part B. Study of solidification, volume changes and prediction of shrinkage tendency by the use of UTA (Expanded Thermal Analysis) and dilatometer

New equipment for simultaneous measurement of volume changes and temperature changes

The major part of the sub project was focusing on the development of a stable reproducible method. In the first layouts it was hard to fill the samplers well enough. Now the problems are solved and the instrument that combines Fourier Thermal Analysis [10] and volume change measurements can be

used for investigations of solidification processes [11]. The method analyses only the melt, not moulding materials or crucibles. The first results show that nucleation of the eutectic phase occurs when local underpressures can be detected, see Figure 7.

Dilatometer measurements of volume changes during solidification of different iron alloys

Due to the strongly anisotropic properties in iron alloys, separate density measurements were done for liquid state and solid state respectively. The results are lots of data which should be further treated to improve modelling. The iron alloys covered carbon contents along liquids and solidus, see Figure 8. The evaluation so far show that the density change in liquid and the density change in austenite does not depend on carbon content [13].

2.4.3 Part C. Numerical treatment of solidification and shrinkage pore formation

The sub projects in Part A and B have delivered separate numerical models. The models are to be implemented in a suitable tool. Flow-3D has been introduced and is currently under evaluation and will after that be used for calculations.

2.4.4 Part D. Industrial scale trials

A very large, industrial scale, trial was performed. The industrial partners all made their major contribution to the project connected to this extensive experiment. Three different sizes, with different solidification times, of a shrinkage pore provoking geometry were cast, three samples of each size and set of process parameters. 81 samples were produced. As expected, different sets of process parameters result in different pore formation tendencies. The observed variation was not totally within the expectations. The medium size samples have been used for ultrasonic testing followed by cutting. Pores could to a large extent be detected. This investigation will be finalised and presented in June 2017. Figure 11 and 12 show the first results.

The research results have been, or will be, presented in six conference reports, six peer-reviewed scientific papers, one Master Thesis, three Licentiate theses and one Doctoral thesis. The researchers have also visited the industrial partners for technical presentations and discussions. The cooperation within the project group has been very well functioning. The final report has also been written in close cooperation between the project participants

2.5 Fulfilment of aims

The final goal, to totally avoid formation of pores that decrease the performance of cast components, cannot be considered fulfilled. But the project has delivered a lot of important knowledge and data necessary to reach that goal. Part A delivered a method for laboratory scale manufacturing of CGI samples by remelting of SGI samples. In Part B, the equipment for simultaneous thermal analysis and volume change measurement has been developed so that it can be used in relevant environment with proper filling of sample cups. Further Part B delivered a lot of data on density of liquid iron and austenite which will improve modelling possibilities. Part C is not finalised, but it is ongoing. Part D has been done. The huge industrial scale experiment was performed and the follow up work is ongoing.

The project has contributed to the aims for FFI in several ways. For example by improved knowledge level at the participating organisations, by an improved international network, by strengthening of the research environment at Jönköping University and by an improved cooperation with the sub supplier SinterCast AB and the analysis company Corr-control. The sub programme “Vehicle development” has the mission to decrease the environmental impact. The project may contribute to this aim by the possibility to decrease the defects formed in the cast components which will render weight reduction, less rejections and improved material properties.

Regarding TRL levels, the sub parts of the projects are at different levels but one example is that the developed equipment evolved from TRL 4 to TRL 6 (according to NASA definition).

3 Bakgrund

Inom den tunga fordonsindustrin ställs det ständigt krav på viktbesparing, effektivare motorer och mindre miljöpåverkan från vägtransporter. Tidigare har gråjärn i regel använts till strategiska motorkomponenter som cylinderblock och cylinderhuvuden. Ett materialbyte till kompaktgrafitjärn har gjorts hos flera tillverkare av tunga fordon de senaste årtiondena. Detta kan både spara vikt och, eftersom kompaktgrafitjärn vanligen är avsevärt starkare än gråjärn, möjliggöra högre förbränningstryck, vilket leder till mer energieffektiva motorer.

Kunskapen om framställning och processkontroll vid tillverkning av kompaktgrafitjärn med avseende på resulterande struktur och egenskaper är väl dokumenterad i litteraturen och det finns en handfull kommersiellt tillgängliga styrprocesser för att åstadkomma detta svårtillverkade material. I komplexa geometrier och i långa serier observeras dock emellanåt defekter i form av krympoporositet. Porerna försämrar materialets egenskaper och komponentens funktionalitet. För en framgångsrik tillverkning av CGI-komponenter krävs alltså ännu bättre kontroll av struktur- och defektbildning vilket kräver metodutveckling.

Projektet SPOFIC genomfördes under perioden 2011-2014 och baserades främst på iakttagelser på komplexa motorkomponenter tillverkade under industriella omständigheter. Tre processparametrar förefaller enligt projektresultaten vara av betydelse för bildning av krympoporositeter:

- Inlöst väte och kväve i smältan (från smältning eller formatmosfär) kan orsaka både gasporer och underlätta kärnbildning och tillväxt av krympoporositet.
- Behandling av basjärnet för att säkerställa kompaktgrafit tillväxt i samband med stelning är den styrande faktorn för att olika andel av oönskade noder grafit uppträder i den färdiga mikrostrukturen.
- Tillsats av ympmedel att styra och befrämja kärnbildning av eutektiska kolonier, så kallade celler, kan orsaka relativt höga antal celler. Både ökande andel grafitnoder och ökande antal eutektiska celler har observerats befrämja krympoporositetsbildning.[1, 2]

Vidare drogs följande slutsatser:

- Gasupptagning till smältan påverkas av turbulent flöde och smutsigt råmaterial.
- Krympporerna är interna porer där förmodligen gashalt och undertryck på grund av krympning bidrar till en heterogen kärnbildning av porer.
- De dendritarmar som kan observeras inuti krympporer är av två typer. I prover med hög nodularitet och låg gashalt har förgrovningsen av dendritarmarna hunnit längre. Låg nodularitet och låg gashalt ger mindre förgrovade dendritarmar i porerna.

Dessutom påbörjades utvecklingen av en metod för att framställa CGI från segjärn i laborativ miljö samt en styrmetod för att minimera risken för porositeter.

4 Syfte, frågeställningar och metod

Syftet med SPOFIC II var att fördjupa kunskaperna om stelningsförloppet vid gjutning av kompaktgrafitjärn (CGI) och att skapa förutsättningar för bättre simulering av stelning av CGI. Detta kommer att kunna bidra till utvecklingen av styr- och kontrollmetoder för att undvika defekter (krympoporositeter).

De konkreta frågeställningarna som behandlades var:

- Hur påverkas krympoporositetsbildningen av:
 - produktionsparametrar i industriell skala?
 - antalet eutektiska celler?

- den så kallade nodulariteten i det stelnde CGI-materialet?
- segringsmönstret i materialet?
- Hur varierar järnets densitet med temperatur, aggregationstillstånd och kemisk sammansättning?
- Hur kan vi på bästa sätt simulera stelningsförlopp och defektbildning?

Svaren på ovanstående frågor söks genom att utföra parameterstudier i industriell miljö samt att utföra experiment under noggranna förutsättningar i laboratoriet. Ett av de inom SPOFIC I undersökta fenomenen, gasupptagning i smälta, utelämnades från fortsatt undersökning eftersom detta till största delen styrs av chagematerial samt formfyllningsförloppet [3]. Övriga parametrar såsom andelen noder i kompaktgrafitjärnet och antalet eutektiska celler vid stelning behövs som studieparametrar i den fortsatta studien.

Projektet var ursprungligen uppdelat i tre delprojekt (A-C), men ytterligare en del, D, tillkom eftersom den inte utfördes inom det föregående projektet SPOFIC. Delprojekten beskrevs ursprungligen som följer:

Del A. Teoretisk modell

Resultat från SPOFIC används för en fördjupad teoribildning kring stelning av kompaktgrafitjärn. Stelningsmekanismen baseras på dendritförgrövning samt segring av element runt primärutskiljda austenitkorn och dess inverkan på den sekundära population av sfäriska grafitpartiklar som ofta uppträder. Resultaten kommer att jämföras med stelningsförlopp i segjärn och gråjärn.

Aktiviteter:

Provkroppar tillverkade under produktionsliknande förhållanden ska smältas om och utsättas för kontrollerade stelningsförlopp i laboratorieuogen i kombination med släckningsexperiment. Genom att efterlikna de svalningskurvor som fås vid faktiska produktionsförhållanden undersöks det dynamiska stelningsförloppet. Genom att införa ett konstant temperaturförhållande följs den temperaturoberoende fasomvandlingen för att förstå hur den primära fasen skiljs ut i kompaktgrafitjärn. Ett viktigt verktyg att studera makrostrukturen blir EPMA, en unik mätmetod utvecklad i Sverige av Corr-control i Avesta.

Del B. Studie av stelning, volymförändringar samt prediktering av krympbenägenhet med UTA och dilatometer

Aktiviteter:

Tillverkning av experimentell utrustning och provkroppar samt utveckling av metod för att studera sugningsbenägenhet vid gjutning av CGI med UTA (utvidgad termisk analys). UTA utrustningen används för att studera deformation och densitetsförändringar under stelningsförlopp med variation av processparametrar som styr eutektiska cellernas densitet. Speciella provkroppar med hög tendens att bilda krympporer framtagna under SPOFIC ska samjutas med UTS utrustningen.

Del C. Beräkning av stelningsfenomen och fenomen i samband med bildning av krympporositet

Aktiviteter:

Lämpligt programpaket för flödessimuleringar (CFD – Computational Fluid Dynamics) ska involveras för att analysera flödesfenomen och värmeledning i samband med gjutning av kompaktgrafitjärn. Vidare ska modeller som beskriver stelning och bildning av krympporositet adderas till CFD-programmet. Väsentliga kunskaper om kärnbildning och tillväxt av primär och eutektisk fas i kompaktgrafit har tagits fram dels under det pågående projektet SPOFIC samt via examensarbeten (se referenslistan). UTA-utrustningen kommer, förutom att informera om krympförhållanden och tendensen till krympporbildning, att utgöra ett verktyg för att ta fram de termofysikaliska egenskaper som behövs för gjutsimulering av stelning i kompaktgrafitjärn.

Del D. Industriförsök med varierande produktionsparametrar

Aktiviteter:

Provgjutning vid ett produktionsgjuteri. Tre olika geometrier ska gjas med varierande Mg-tillsats, och ympning. Den kemiska sammansättningen, inklusive kolekvivalent, hålls så konstant som möjligt. De gjutna kropparna ska sedan användas för att undersöka hur ultraljudsundersökningar kan detektera olika typer av porer. Därefter undersöks mikrostrukturen och porernas karakteristik närmare.

5 Mål

Det slutgiltiga målet med projektet är att undvika bildning av krympoporiteter som försämrar materialets egenskaper eller stör komponentens funktion. För att nå detta mål formulerades i ansökan om finansiering följande målsättningar:

Fortsättningsprojektet, SPOFIC II, avses utveckla vidare kunskap om stelningsförlopp vid gjutning av kompaktgrafitjärn (CGI) samt förfinas de styr- och kontrollmetoder som levererats av SPOFIC. Ytterligare ett mål är att skapa förutsättningar för bättre simulering av stelning av CGI.

Delprojekten A-D hade egna mål:

Del A. Teoretisk modell

Resultat från det teoretiska arbetet ska användas för att förstå och förutse under vilka omständigheter en sekundär population av grafitnoder bildas och hur den kan undvikas.

Del B. Studie av stelning, volymförändringar samt prediktering av krympbenägenhet med UTA och dilatometer

Resultat från denna del ska användas för att förstå och förutse hur kompaktgrafitjárnets volym och densitet utvecklas under stelningsförloppet samt hur den eutektiska celldensiteten påverkar krymporobildning.

Del C. Beräkning av stelningsfenomen och fenomen i samband med bildning av krympoporitet

Att genomföra och förfinas beräkningar av stelningsförlopp i kompaktgrafitjärn samt utvidga med beräkningar av de fenomen som uppträder i samband med bildning av krympopor.

Del D. Industriförsök med varierande produktionsparametrar

Att korrelera porbenägenhet, mikrostruktur och porer till produktionsparametrar.
Att kartlägga hur den oförstörande provningsmetoden ultraljud kan detektera porer i CGI-gods.

6 Resultat och måluppfyllelse

6.1 Resultat Del A. Teoretisk modell

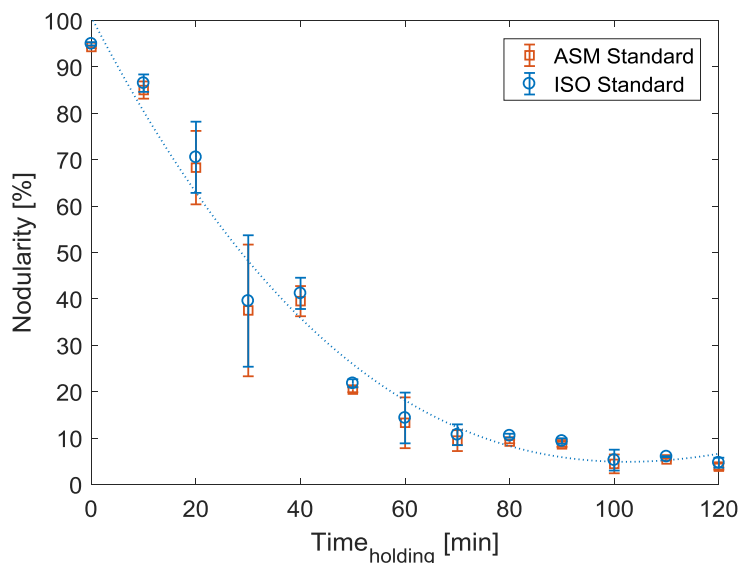
Metod för produktion av olika gjutjärnstyper genom omsmältning av nodulärt gjutjärn

Framställning av kompaktgrafitjärn kräver en mycket noggrann kontroll av det metallurgiska tillståndet hos smältan. Det krävs samverkan mellan magnesiumtillsats, kolekvivalent, ympning, gjuttemperatur med mera vilket gör tillverkning av kompaktgrafitjärn i industriell skala till en mycket komplex process. Det har varit mycket svårt att framställa små mängder kompaktgrafitjärn genom smältbehandling eftersom denna komplexa process lätt blir instabil. Istället har projektet arbetat med att utveckla en metod som bygger på omsmältning. Vid de tidigaste försöken utgick omsmältningen från kompaktgrafitjärn vilket inte gav reproducerbara resultat. Efter ombyggnad av en tillgänglig ugn som värms resistivt kunde en noggrann och reproducerbar metod etableras. I denna framgångsrika metod utgår man från överbehandlad segjärnssmälta som efter omsmältning hålls i flytande tillstånd

olika länge. Det har visat sig att den bildade grafitmorfologin är proportionell mot hålltiden i smält tillstånd, se Tabell 1 och Figur 1-2.

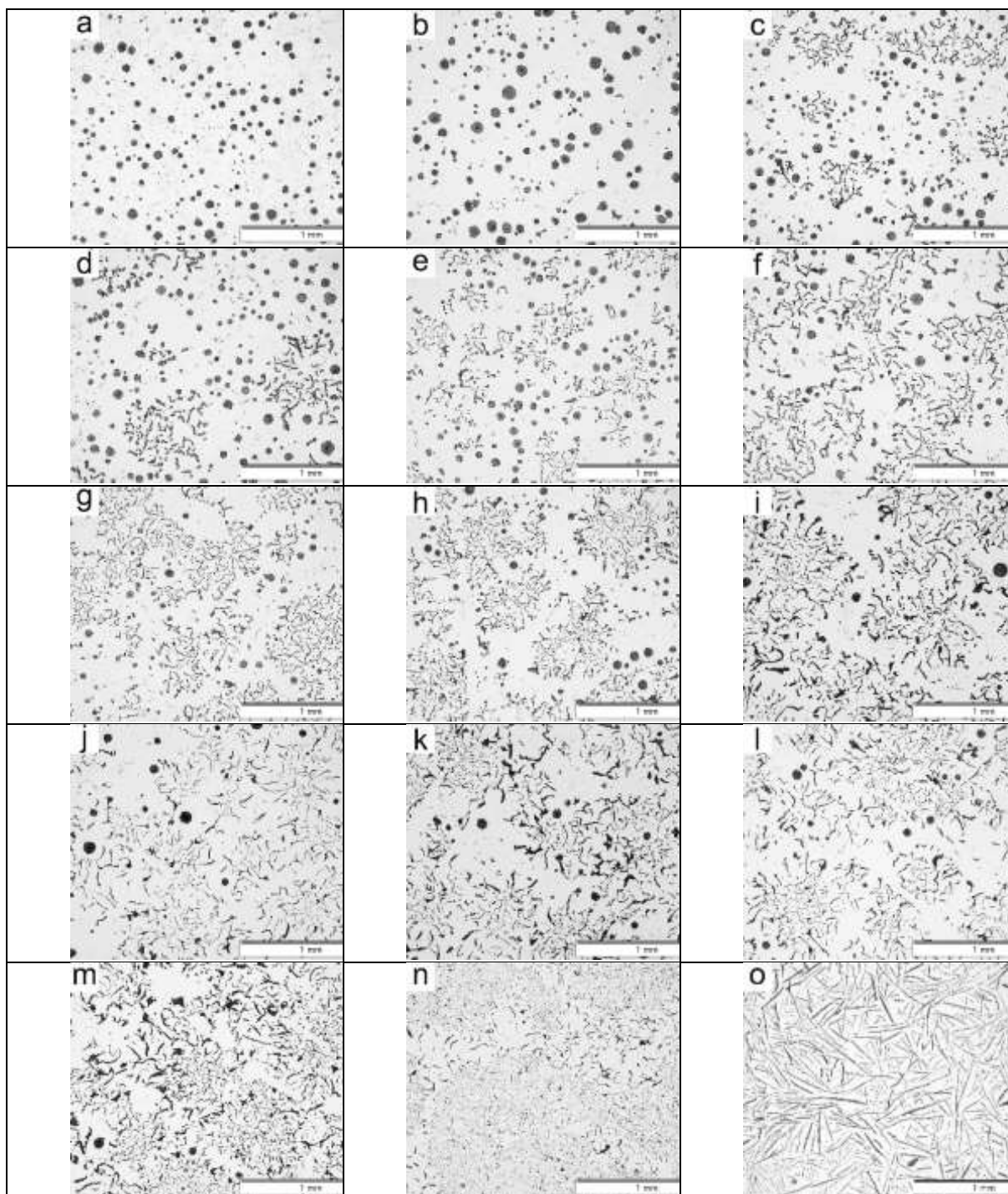
Tabell 1. Översikt över de omsmälta experimentserierna.

Sample ID	H0	H10	H20	H30	H40	H50	H60	H70	H80	H90	H100	H110	H120	H130	H140
Holding time (min)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
Repetitions	2	4	3	3	3	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2



Figur 1. Nodularitet som funktion av hålltid. Kvadraterna representerar medelvärden beräknade enligt ASM standard E2567. Cirklar representerar medelvärden beräknade enligt standard ISO 16122. Felstaplarna markerar 95% konfidensintervall och kurvan är ett andragradspolynom som har anpassats till samtliga värden beräknade enligt ISO 16122.

Resultaten för hålltider mellan 50 och 100 minuter visar att den utvecklade experimentmetoden möjliggör framställning av gjutjärn med en grafitmorfologi inom ramarna för de internationella standarder som gäller för kompaktgratitjärn. [4]. Detta tyder på en mycket stabil och reproducerbar metod.

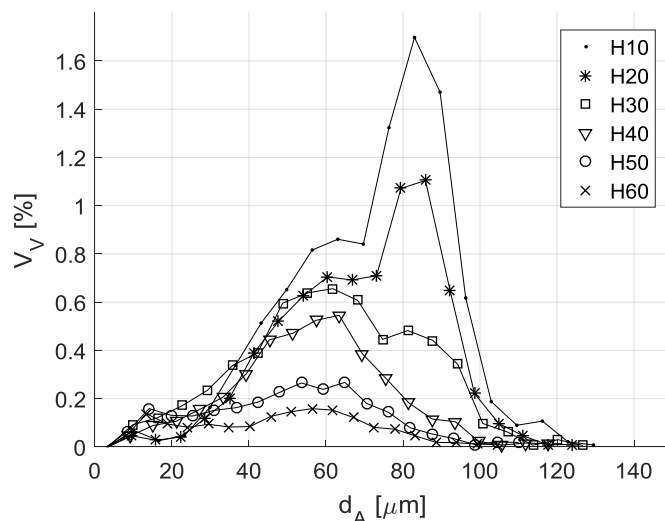


Figur 2. Mikrostrukturen hos omsmält material med olika hålltid i smält tillstånd: a) 0, b) 10, c) 20, d) 30, e) 40, f) 50, g) 60, h) 70, i) 80, j) 90, k) 100 l) 110, m) 120, n) 130, and o) 140 minuter.

Bildande av dubbelpopulation grafitnoduler i kompaktgrafitjärn

Storleksfördelningen av grafitnodulerna studerades noggrant i alla prover (H10 till H60) med bildanalys och efterbehandling med hjälp av Matlab. Storleksfördelningen mätt på tvärsnitt av proverna översattes till volymetrisk fördelning. Det fastställdes att populationen i huvudsak bestod av två subpopulationer, se Figur 3. Populationen med större noduler kopplades till värmeutveckling vid

temperaturer högre än den eutektiska temperaturen vilket tolkas som att det rör sig om primär grafit. Med längre hålltid krympte och senarelades denna värmeutveckling samtidigt som den primära nodulpopulationen minskade i större utsträckning än den sekundära. Från och med hålltiden 40 min kunde inte längre varken den övereutektiska värmeutvecklingen eller någon primär nodulpopulation urskiljas. Temperaturkurvorna visade vidare att kärnbildningstemperaturen för grafit och austenit var högst vid 10 minuters hålltid och sedan sjönk kraftigt för ökade hålltider till en mer stabil temperatur. En möjlig tolkning är att oupplösta partiklar, som underlättar kärnbildning, kvarstår i smältan vid kort hålltid och dessa successivt löses upp vid förlängd hålltid. Om detta antagande stämmer, indikerar detta även att primärgrafit kan undertryckas vid avsaknad av lämpliga kärnbildningssubstrat vid en kolektivvalent så hög som $CE=4.73$ w.%. Indirekt kan vi därmed dra slutsatsen att primärgrafit främjas av riklig ympmedelsbehandling. Alltså anses det sannolikt att den mindre subpopulation av stora noder som i det tidigare projektet observerades i anknötning till porer var primär grafit som främjats av en kombination av övereutektisk sammansättning och riklig ympning. Huruvida denna subpopulation av stora noder bidrar till krympopor eller ej är fortfarande oklart, men i litteraturen antas ofta att primär utskiljning av grafit bör undvikas eftersom den bidrar till expansion i ett stadie av stelningsen då smälta behöver matas fritt till krympande områden.



Figur 3. Uppmätt storleksfördelning av nodulär grafit, uttryckt som volumfraktion, för prover som utsatts för hålltider mellan 10 och 60 minuter, motsvarande nodularitet mellan 15-95%.

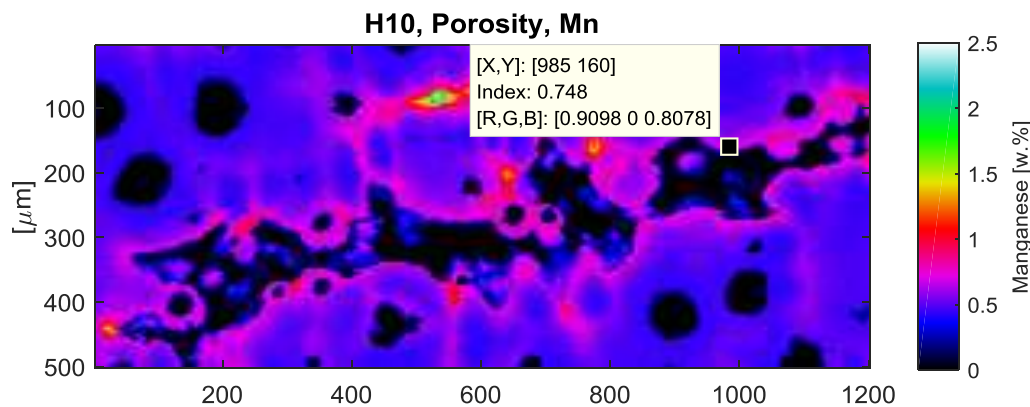
Temperaturkurvorna för hålltiden 10 minuter (motsvarande ~93% nodulär grafit) uppvisade två maxima efter att stelningsen startat medan temperaturkurvorna för längre hålltider endast uppvisade ett maximum. Andra forskare har föreslagit att detta beteende hos segjärn hänger ihop med en eutektisk reaktion som inleds med att dendritisk austenit och grafitnoder växer separerade via utbyte av kol genom smältan, följt av ett skede där grafiten omsluts av austenit varvid tillväxten begränsas av diffusion av kol genom austenitskalet. Färgetsning visade visserligen att proverna behandlade med 10 min innehöll dendritisk austenit, men det gjorde samtliga prover, så relationen mellan kylkurvas karaktärsdrag och tvåstegsreaktionen beskriven av Pedersen och Tiedje är inte tydlig i detta fall. Förklaringen ligger möjligtvis i att stelningshastigheten av eutektiska celler med vermikulär grafit inte begränsas av diffusion genom austenit vilket leder till att temperaturen inte tillåts falla mellan första och andra stadiet [5].

Mikrosegning

EPMA (Electron Probe Micro Analysis) är en analysmetod som kan användas för att utvärdera kemisk sammansättning. Den utrustning som har använts i detta arbete är ursprungligen ett konventionellt instrument. Företaget som äger utrustningen, Corr-control, har genom åren

vidareutvecklat både hårdvara och mjukvara vilket har skapat ett instrument med en alldeles unik upplösning. EPMA-analys utfördes på ett utvalt prov för varje hålltid. Med känd sammansättning i varje punkt i metallmatrisen beräknades fördelningen av lokal stelningsstemperatur i materialen vilket man hoppades skulle ge ledtrådar till skillnader i materialens matningsbeteende. Vidare användes den lokala stelningsstemperaturen för att spåra legeringsämnenas segringsbeteende under materialets stelningsprocess. EPMA-data från det förra projektet SPOFIC analyserades också med samma metod. Slutsatsen är att förutom skillnader i spatial fördelning orsakad av skillnaden i storlek hos nodulära och vermikulära eutektiska celler så indikerar analysen, för de analyserade legeringsämnena, att fördelningen mellan smälta och fast fas är ungefär densamma för segjärn och kompaktgråjärn (framställda under produktionsliknande förhållanden). Därmed verkar stelningsstemperaturen vara oberoende av grafitmorfologin. Det lamellära gråjärn som studerades inom SPOFIC uppvisade däremot relativt kraftig avvikelser från övriga undersökta material, mest tydligt för mangan. Fördelningen av mangan (koncentration i stelnad struktur dividerad med koncentration i smälta) var i LGI ~ 0.9 jämfört med ~ 0.7 i CGI och SGI. Detta indikerar att bara en tredjedel så mycket mangan anrikas i smältan i LGI jämfört med i CGI och SGI. Detta beror sannolikt på den relativt rika tillgången på svavel i LGI, vilket leder till att en stor del av det Mn som avvisas till smältan bildar MnS istället för att ackumuleras inlöst i smältan. Den ökade segringen av mangan i CGI och SGI leder till en sänkt stelningsstemperatur och en ökad tendens till karbidbildning hos sista smältan [6].

Vad det gäller proverna framställda genom omsmältning och olika hålltider i smält tillstånd följda av släckning kan resultaten från EPMA-analyserna kombineras med temperaturkurvor från framställningstillfällena för att koppla mikrostrukturens olika delar till stelningskurvan. Exempelvis har provet med hålltiden 10 minuter en krympopor, se Figur 4. Sammansättningen invid poren, här illustrerad med manganhalt, förefaller vara någorlunda homogen. Denna sammansättning jämfördes med sammansättningen i ett porfritt (friskt) område som funktion av fraktion stelnad fas. Utifrån denna information kunde fraktion stelnad fas vid bildandet av poren i Figur 4 uppskattas till cirka 71% [7]. Utförligare analys av denna del kommer att presenteras i en licentiatavhandling som planeras att presenteras i maj 2017 [15].

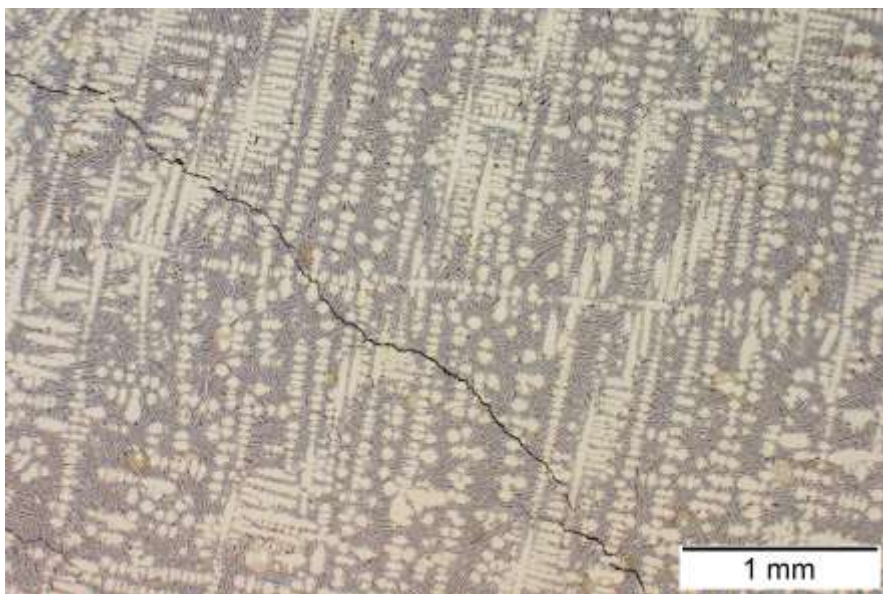


Figur 4. Koncentrationsprofilen av mangan i ett nodulärt gjutjärnsprov med en krympoporositet.

Karakterisering

I samband med utvecklingen av omsmältningstekniken upptäcktes en ny etsningsmetod för att karakterisera primär austenit i samband med släckningsexperiment [8], se Figur 5.

Vidare har betydande arbete genomförts med att kalibrera och förbättra EPMA-metoden för att tillämpa den på gjutjärn [9].



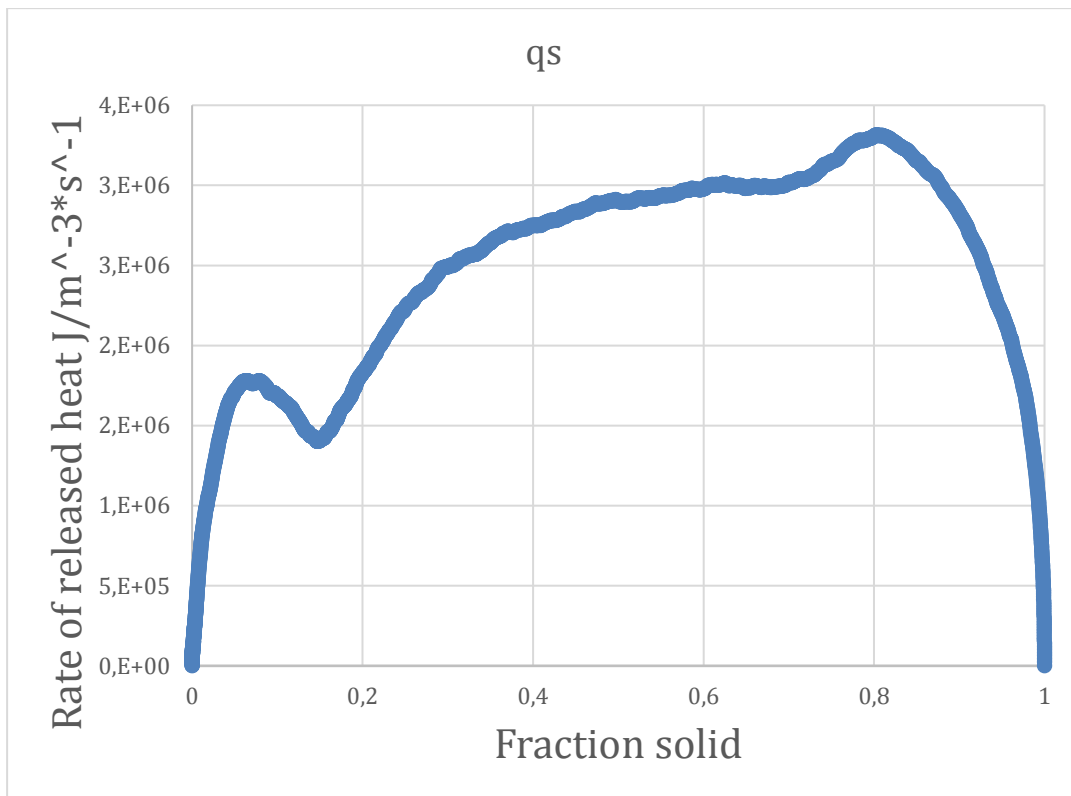
Figur 5. Mikrostruktur av en släckt gjutjärnsprov etsad med den nyutvecklade etsningsmetoden [8]

6.2 Resultat Del B. Studie av stelning, volymförändringar samt prediktering av krympbenägenhet med UTA och dilatometer

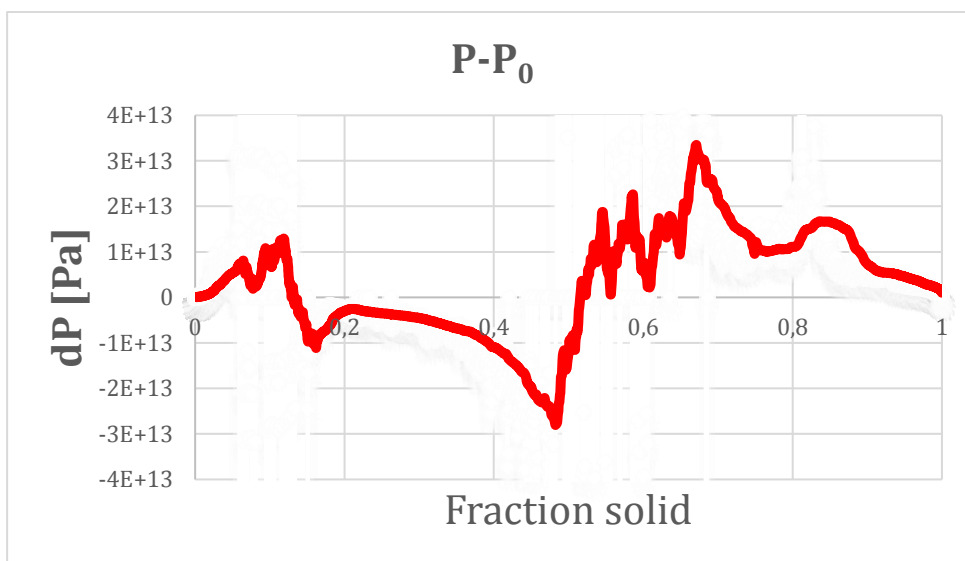
Ny utrustning för att mäta volymförändringar i samband med stelning av kompaktgrafitjärn.

Större delen av projektaktiviteten ägnades åt att utveckla ett stabilt och reproducerbart mätarrangemang. Den ursprungliga designen gav stora problem med formfyllnad i samband med provtagning. Dessa problem är numera lösta. Vidare ägnades mycket resurser åt att utveckla tillförlitliga temperatur- och deformationsmätningar. Ett avtal tecknades mellan projektutföraren JTH och ett par av de deltagande företagspartnerna varefter en patentansökan för det utvecklade instrumentet kunde lämnas in. Det mesta av patentarbetet utfördes inom det parallella projektet VastIron.

Termisk analys baserat på Fourier Termisk Analys [10] i kombination med volymmätningar tillför en helt ny möjlighet att tolka stelningsförloppet i järnlegeringar [11]. Mätmetoden är oberoende av formmaterial och har påvisat att kärnbildning av den eutektiska fasen inträffar under undertryck i interdendritiska (materialet mellan austenitdendriterna) områden, se Figur 5. Termisk analys indikerar också utskiljning av främmande faser (annan än eutektisk fas) mot slutet av stelningsförloppet under övertryck i interdendritiska områden. I kompaktgrafitjärn kan detta betyda utskiljning av nodulär grafit, se Figur 6. Indikationer på den främmande fasen kan iaktas när fraktionen stelnad fas är mellan 0,8 och 0,9 i både Figur 6 och 7. Utförligare beskrivning av den använda mätmetoden kommer att presenteras i en doktorsavhandling som planeras att läggas fram i juni 2017 [17].



Figur 6. Värmefflöde vid stelning av kompaktgrafitjärn.



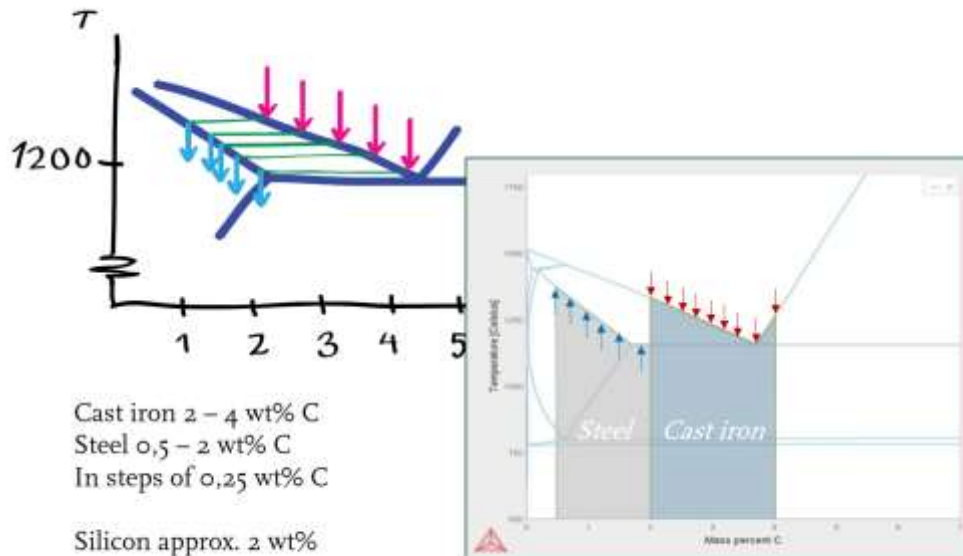
Figur 7. Avvikelsen från atmosfärstryck inuti den likaxliga zonen under stelning av kompaktgrafitjärn.

Dilatometermätningar av volymförändringar i samband med stelning av olika järnlegeringar.

En omfattande litteraturstudie genomfördes för att kartlägga problemen i samband med densitetsmätningar vid stelning av gjutjärn [12].

Med tanke på materialens starkt anisotropiska egenskaper inom stelningsintervallet genomfördes separata densitetsmätningar för flytande fasen respektive austenitfasen. Resultaten ska sedan samköras via numerisk simulering där andelen tillväxande austenit, grafit och smälta beaktas enligt kända stelningsmodeller.

Experimentmaterialet skapades i laborationsmiljö i en induktionsugn som rymmer 10 kg metall. Kolhalten varierades längs soliduslinjen (austenit – austenit+smälta) för austenitens densitet och längst liquiduslinjen (austenit+smälta – smälta) för smältans densitet, se Figur 8. Övriga halter hölls så konstanta som möjligt, exempelvis var kiselhalten cirka 2 % .



Figur 8. Experimentellt schema för densitetsmätningar.

Utvärdering av resultaten visar att densitetskurvans lutning vid krympning i flytande fas respektive i austenitfasens expansion i samband med uppvärmning (innan smältning) inte beror av kolhalten vilket stämmer överens med uppgifter i litteraturen [13].

Det undersökta materialet var inte behandlat för att styra grafitmorfologin vilket innebär att proverna stelnade med lamellär grafit. Huruvida behandlade provers beteende avviker från dessa observationer bör undersökas inom ett kommande projekt.

Utförligare analys av denna del kommer att presenteras i en licentiatavhandling som planeras att presenteras i september 2017 [16].

6.3 Del C. Beräkning av stelningsfenomen och fenomen i samband med bildning av krympporositet.

Syftet med denna delaktivitet var att skapa numeriska modeller och implementering i simuleringsprogram för att beräkna tendenser till porositetsbildning.

Både stelnings-, volymförändrings- och densitetsmätningsexperiment (inom Del A och Del B) har resulterat i separata modeller.

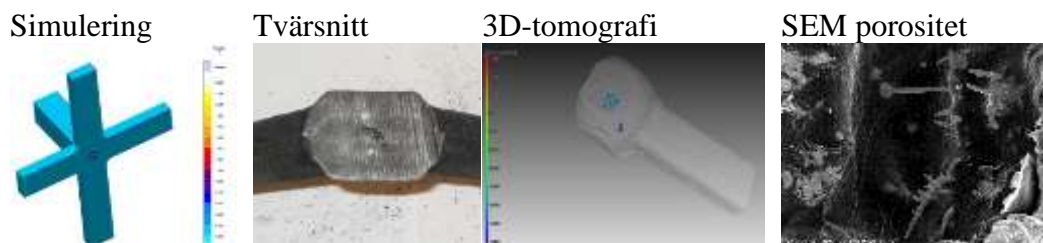
Införskaffning av ett lämpligt simuleringsverktyg för att samla utvecklade beräkningsmodeller har skett under senare skede av projektet. Programkoden Flow-3D är under inkörning och anses kunna användas för avancerade beräkningar efter avslutning av detta projekt.

6.4 Del D. Industriförsök med varierande produktionsparametrar

I slutet av det föregående projektet SPOFIC utvecklades provkroppar som kan provocera fram krympporositeter vid gjutning av kompaktgrafitjärn i industriell skala. Vid ett mycket omfattande gjutexperiment varierades lämpliga gjutparametrar vid gjutning av dessa provkroppar. Industriparternas bidrag till projektet täcktes till stora delar av insatser kopplade till detta experiment. Volvo tog fram lämpliga geometrier och tillverkade sandformar, Scania gjorde själva gjutningen, Sintercast stöttade smältverket under experimentet och Swerea Swecast deltog i både planering, genomförande och uppföljning. För varje uppsättning gjutparametrar göts 3 exemplar av 3 olika storlekar, se uppställningen i Figur 9. Metodologin för provkroppdesign och utvärdering beskrivs i Figur 10.

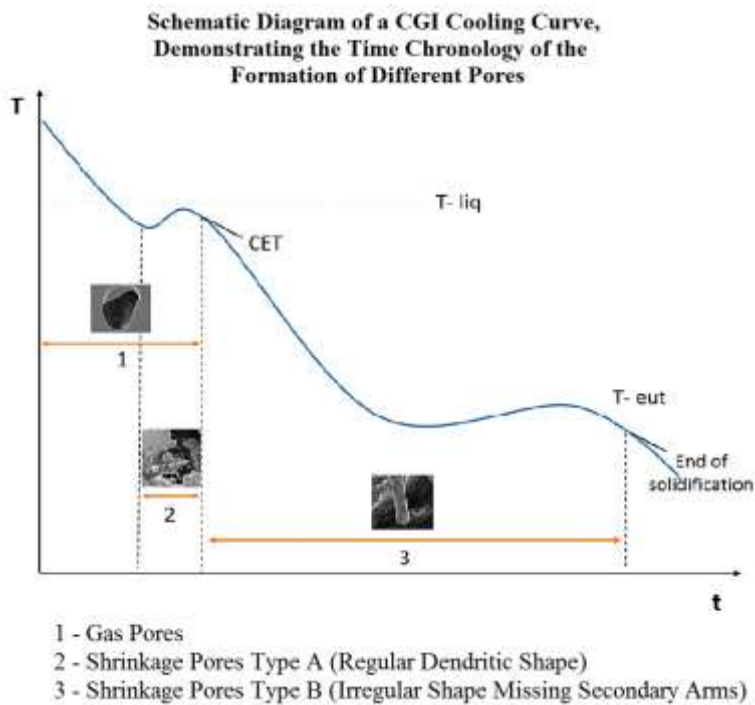


Figur 9. För varje uppsättning gjutparametrar göts 3 provkroppar vardera av 3 olika storlekar.

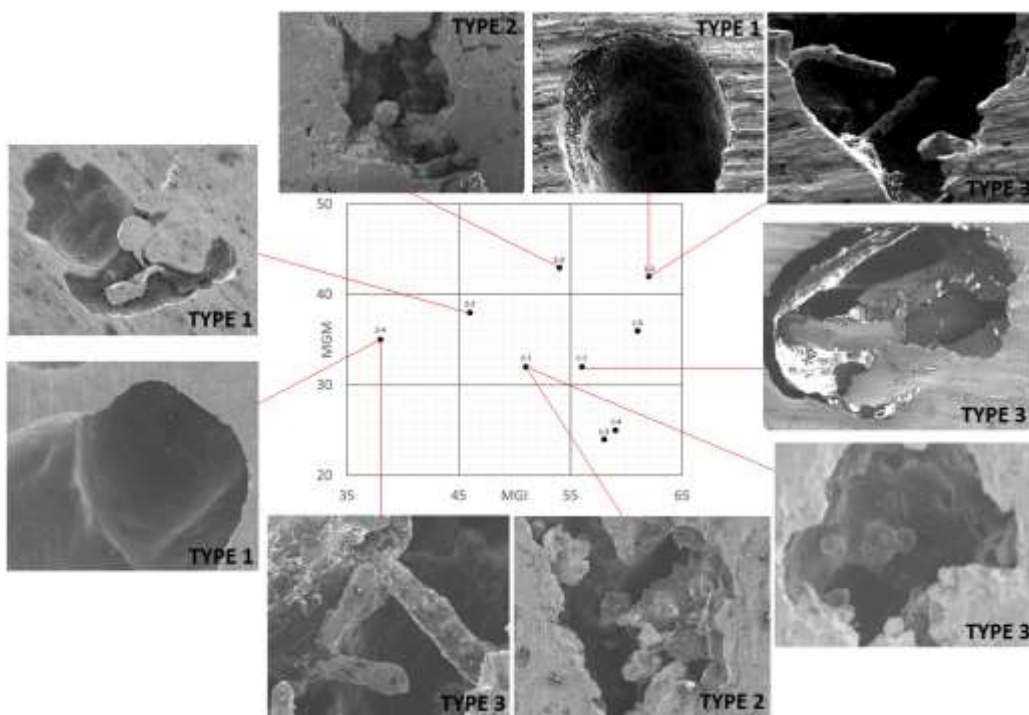


Figur 10. Simulering, tvärsnitt, 3D tomografi samt SEM av provkroppsgemetrier för provokation av porositetsbildning

De tre provkroppstorlekarna resulterade i tre olika stelningstider. Formarna var tillverkade av furanbunden kvartssand. Processparametrar definierade i den kommersiella CGI-metoden från SinterCast AB varierades. Vid detta försök valdes parametrarna MGM som beskriver magnesiumbehandlingen och MGI som beskriver ympningen. Övriga parametrar hölls så konstanta som möjligt. Totalt producerades 81 stycken provkroppar. Provkroppar med medelstelningstiden valdes ut för undersökning med ultraljud. Resultaten från ultraljudsundersökningarna jämfördes med utseendet av de uppkapade provkropparna varvid en relativt hög överensstämmelse kunde konstateras. Porositeternas inre undersöktes med SEM och det konstaterades att samtliga tre tidigare observerade portyper fanns representerade. I Figur 11 och 12 visas bilder på krympporositeter relaterade till stelningförloppet samt till kombinationen av processparametrarna MGM och MGI.



Figur 11. Uppskattat stadie av stelningen för bildning av de tre typerna av porer som identifierats.



Figur 12. Bilder på porositet hittade i provkroppar som funktion av processparametrar MGM och MGI. Serien med provkoder 2-1,2-2,2-3,2-4 och 2-5 överskrider 20% nodularitet vilket sammanfaller med prover där huvuddelen av krympporositet förekommer.

En utförligare rapport med utvärdering av resultat från dessa gjutexperimentet kommer att presenteras i juni 2017 i form av ett examensarbete vid Jönköping University. [14]

6.5 Måluppfyllelse

Det slutgiltiga målet, eller visionen, att helt undvika bildning av krympoporositeter som försämrar materialets egenskaper eller stör komponentens funktion är ännu inte uppnått.

Men projektet har i stor utsträckning utvecklat kunskap om stelningförloppet.

Inom del A har en reproducerbar metod för framställning av CGI-prover färdigutvecklats och de experimentella resultaten har resulterat i en hypotes för bildning av en sekundär nodulpopulation. Vidare har dennas betydelse omvärderats.

Analysutrustningen/metoden som kombinerar termisk analys med volymförändringsmätning är så pass utvecklad att den inom kort kan användas i en industriell process. Detta möjliggör omfattande parameterstudier för att korrelera porbildning och porkaraktersistik till produktionsparametrar vilket i sin tur leder till en möjlighet att styra och kontrollera porbildningen.

Bättre simulering kräver förfinade modeller samt relevant data. Delprojekt B har förutom ovannämnda utrustning levererat data om hur densiteten varierar i såväl smälta som fast fas. Inom både del A och B har förfinade numeriska modeller för stelning- och krympningsförlopp påbörjats. Däremot har Del C inte helt kunnat realiseras. Introduktionen av en mjukvara som inte innebär så mycket restriktioner som vanligen använda kommersiella gjutsimuleringsprogram anses möjliggöra simulering av mycket hög kvalitet.

Industriförsöket som utfördes inom Del D var mycket omfattande men kunde ändå bara kartlägga ett fåtal produktionsparametrar. Arbetet med att utvärdera de framtagna proverna pågår ännu. Stora delar av målen (korrelera porer till produktionsparametrar samt kartlägga hur ultraljud kan användas för detektering av porer) anses kunna uppfyllas genom färdigställande av det pågående examensarbetet.

Angående projektets relation till FFI:s generella mål som de beskrivs i Programbeskrivning för Fordonsutveckling (2011-02-01) har projektet i högsta grad bedrivits problemorienterat baserat på strategier med mål och partsgemensamma behov samt ökat den nationella forskningskapaciteten på området. Företagens konkurrenskraft, och därmed antalet arbetstillfällen, anses i hög grad bero på kunskapsnivån inom organisationen. Projektet har bidragit med att öka kunskapen hos fler än de direkt inblandade personerna. De deltagande forskarna har under projekttiden vidareutvecklat sitt redan etablerade internationella nätverk med såväl akademiska som industriella miljöer.

Forskningsresultaten har eller kommer att kommuniceras med omvärlden genom deltagande vid internationella konferenser samt genom publicering av granskade vetenskapliga artiklar i ansedda tidskrifter. Detta projekt ingår i en långsiktig vision för forskningsområdet. Ett antal projekt har föregått detta och behovet av framtida forskningsprojekt är mycket tydligt. Nya ansökningar planeras för att följa upp de framtagna resultaten. Tillverkarna av tunga fordon (Scania och Volvo) har samverkat med Jönköping University samt ofta även med Swerea Swecast i många av de tidigare projektet. Samarbetet fungerar mycket väl. I detta projekt har dessutom underleverantören SinterCast AB samt analysföretaget Corr-control deltagit vilket tillfört mycket viktig kunskap.

Delprogrammet Fordonsutveckling formulerar en mission som handlar om minskad miljöpåverkan och energiförbrukning, en vision om att svensk fordonsindustri ska vara ledande inom säkerhet och miljöpåverkan samt ett mål att ”höja den tekniska mognadsgraden (genom att mäta ”technology readiness level”, TRL) samt effektivisera metoder inom produktutveckling för att snabbare kunna industrialisera resultaten och öka kundvärdet”. Den tekniska mognadsgraden definitivt höjts. Projektets olika delar befinner sig dock på ganska olika nivåer men samtliga uppskattas ha rört sig åtminstone ett steg uppåt. Exempelvis anses den utvecklade utrustningen för samtidig termisk analys och volymförändringsmätning ha rört sig från TRL 4 till 6 enligt NASAs definitioner.

Vidare ska ”Materialteknik för effektivare fordon” ge fordonsindustrin tillgång till nydanande materialanvändning. I detta projekt är själva materialet inte helt nytt, men en minskad defektrisk kommer att möjliggöra lättare komponenter (viktreduktion), minskad andel skrot (kostnadsreduktion) samt i praktiken bättre materialegenskaper eftersom de i denna typ av material ofta begränsas av defekter. Framtagna modeller och data kommer i en inte alltför avlägsen framtid kunna användas för att förbättra modellering och simulering vilket kan förkorta produktutvecklingstiden samt minska behovet av fysisk provning.

7 Spridning och publicering

Forskningsresultaten har presenterats, eller kommer att presenteras, i sex konferensbidrag, sex vetenskapliga artiklar, ett examensarbeten, tre licentiatavhandlingar samt en doktorsavhandling. Dessutom har forskarutförarna besökt de deltagande företagen ett flertal gånger för att presentera forskningsresultat samt diskutera företagets utmaningar. Samarbetet mellan industri och akademi fungerar mycket bra.

7.1 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	X	
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	X	
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	X	
Introduceras på marknaden		
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

Projekten CastDesign (2013-03303) samt VastIron (2014-0199) bedrevs parallellt med SPOFIC II. Forskningsframstegen inom projekten har många beröringspunkter och de deltagande forskarna har haft ett mycket väl fungerande samarbete vilket underlättade och påskyndade respektive delprojekt.

7.2 Publikationer

1. **S. Vazehrad:** A Study on Factors Influencing the Microstructure and Shrinkage Porosity Formation in Compacted Graphite Iron. Licentiate thesis at Royal Institute of Technology, Stockholm, 2014-10-10.
2. **S. Vazehrad, J. Elfsberg, A. Diószegi:** On Factors Influencing Macro Shrinkage Porosity Formation in Compacted Graphite Iron, Materials Science Forum Vols. 790-791 (2014) pp 429-434. © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland.
3. **A. Diószegi, J. Elfsberg, Z. Diószegi:** Solubility of Hydrogen and Nitrogen in liquid cast iron during melting and mold filling. Proceedings of the 72nd World Foundry Congress, 21-25th May 2016, Nagoya, Japan. Based on results from SPOFIC. *Awarded with the best conference paper award.*

4. **J. C. Hernando, B. Domeij, D. González, J. M. Amieva, A. Diószegi:** Nodularity and Fading Control in Compacted Graphite Iron Production on Laboratory Scale. Submitted to Metallurgical and Materials Transactions B.
5. **B. Domeij, J.C. Hernando, A. Diószegi:** Size distribution of Graphite Nodules in Hypereutectic Cast Irons of varying Nodularity, Submitted to Metallurgical and Materials Transactions B.
6. **B. Domeij, A. Diószegi:** Inferring the development of microsegregation and microstructure in Spheroidal and Compacted Graphite Iron using EPMA-WDS. Submitted to SP17 <https://sp17.info/>
7. **B. Domeij, A. Diószegi:** Analyses of microsegregation and shrinkage porosity formation in spheroidal and compacted graphite irons using EPMA-WDS. Submitted and accepted for presentation at SPCI-XI. <http://ju.se/spci2017>
8. **B. Domeij, J. C. Hernando, A. Diószegi:** Quantification of Dendritic Austenite after Interrupted Solidification in a Hypoeutectic Lamellar Graphite Iron. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 5 (1), 28-42, 2016. *This publication has been chosen as a 2016 Editor's Choice article by the Editor of Metallography, Microstructure, and Analysis.*
<http://link.springer.com/article/10.1007/s13632-015-0250-0>
9. **G. Runnsjö, K. Grönlund:** Quantified X-ray mapping in the WDS mode. Submitted and accepted for presentation at SPCI-XI. <http://ju.se/spci2017>
10. **A. Diószegi, J. Hattel:** An inverse thermal analysis method to study the solidification in cast iron. *Journal of Cast Metals Research*, 2004, volume 17, p311-318.
11. **P. Svidró, A. Diószegi:** New thermodynamic measurement method at solidification of cast iron. Submitted and accepted for presentation at SPCI-XI. <http://ju.se/spci2017>
12. **K. Hellström, A. Diószegi, L. Diaconu:** On the problems of density measurements, in relation to cast iron. Submitted to *Metals*. <http://www.mdpi.com/journal/metals/>
13. **K. Hellström, A. Diószegi, L. Diaconu:** Density variations at solidification of grey cast iron, Submitted and accepted for presentation at SPCI-XI. <http://ju.se/spci2017>
14. **F. Fonseca:** Shrinkage porosity formation at casting of Compacted graphite iron. MSc theses to be submitted at Jönköping University, June 2017.
15. **B. Domeij:** On the solidification of Compacted and Spheroidal Graphite Iron, Licentiate thesis at Jönköping University, to be presented on 2017-05-22 at Jönköping University.
16. **K. Hellström:** Density variation at solidification of Cast Iron, Licentiate thesis at Jönköping University, to be presented on 2017-09-01 at Jönköping University.
17. **P. Svidró:** Volume Change Measurements at Solidification of Cast Iron, Doctoral thesis at KTH, to be presented September 2017 at KTH.

7.3 Omvärldsbevakning

Under projekttiden har flera deltagare hållit sig uppdaterade om vad som gjorts och görs på området. Följande sammanfattning gjordes av en av projektdeltagarna inför projektets avslutning.

Inom forskningsområdet rörande gjutjärn med vermikulär grafit, så kallat kompaktgrafitjärn eller CGI, finns det flera arbeten som försöker beskriva den komplicerade grafitstrukturen och föreslå hur man kontrollerar genom att tillämpa ett snävt processfönster. Det viktigt att belysa att endast arbeten med lättbearbetade CGI-varianter, utan titantillsats, är relevanta att beakta för moderna CGI-applikationer. Många moderna CGI-processer bygger på Bäckeruds processpatent från 1994 [Bäckerud]. Syftet med detta avsnitt är att klargöra vissa frågor som rör krympoporositeter i kompaktgrafitjärn. Förvånansvärt lite forskning har direkt tagit upp frågan om krympoporositeter i kompaktgrafitjärn.

Generellt kan krympoporositeter delas upp i fyra typer med minskande storlekskala [Sillén]:

- sjunkningar
- makrosugningar
- mikrosugningar
- porositeter

Samtliga defekter kan kopplas till att det lokala trycket påverkas av matningsförhållanden, primär austenitdendritbildning eller gasutskiljning i samband med stelning. Följande gjutparametrar och förhållanden anses påverka porbildningen:

- För hög gjuttemperatur
- Otillräcklig smältamatning ner till den eutektiska temperaturen på grund av otillräcklig matarstorlek eller felaktig matarposition [AFS 08_129]
- Formens egenskaper, exempelvis fukthalt, bentonit och andra tillsatser, hårdhet, fastspänning.
- Olämplig metallurgi som kan yttra sig som:
 - för tidig primär dendritbildning på grund av för låg kolekvivalent
 - primär karbidbildning på grund av otillräcklig ympning och alltför låg eutektisk temperatur på grund av mikrosegring av karbidbildare såsom Mg, Nb och V.
 - Tidig eller oförutsägbar grafitutskiljning, ibland kopplad till för hög rekalescens på grund av dålig ympning eller olämplig svavelhalt i bassmältan [White]. Svavelhalten är avgörande för bildningen av sulfidpartiklar som anses fungera som kärnbildningsställen i CGI och SGI [Skaland 1992 & Huff 2016]
 - Smältkontaminering av mer än 5 ppm väte eller 90 ppm kväve [Dioszegi]

Förutsatt att gjutprocessen varit tillfredsställande med avseende på ovannämnda förhållanden kommer de kritiska parametrarna för CGI-tillverkning att vara magnesiumbehandlingen och ympningen [Dawson 2002]. Komplexiteten och kopplingen mellan Mg-tillsats och ympning har behandlats i detalj genom processfönsterstudier [Dawson 2002], simulering och verifiering genom att analysera stelnings/svalningskurvor för gjutjärn [Heisser] och omfattande datorstödda analyser av stelnings/svalningskurvor från exempelvis termisk analys [Larranga et al 2008]. Trots bristande information om använda modeller görs följande intressanta observationer:

Underkylningen (dT/dt) är större för lägre magnesiuminnehåll. Detta innebär att andelen grafit, och följaktligen omfattningen av grafitexpansionen, är större för lägre magnesiuminnehåll. Alltså är antalet noder, parametern n , högre enligt modellen presenterad av Larranga et al. [Larranga]. I samma studie presenteras parametern k som representerar risken för krympopor. Parametern k antar värden mellan 0 och 1 där 1 motsvarar lägst risk för porer. Utvärdering av denna parameter för CGI-resultaten i arbetet av Heisser antyder att fördubblad ympningsgrad ger 15% mer krympoporositet.

Mer fördjupade kunskaper om hur austeniten och grafiten kärnbildas och tillväxer kommer att möjliggöra bättre verktyg för att prediktera och/eller kontrollera bildningen av krymporer. Avancerad, datorstödd, analys av stelnings-/svalningskurvor förutspås användas för kunskapsuppbyggnad och processkontroll i än större utsträckning än idag.

Avslutningsvis förtjänar föregångarna inom forskningsområdet stor tacksamhet för den imponerande utveckling som skett inom mikrostrukturanalysmetoder de senaste femtio åren. Hillert publicerade 1962 ett banbrytande arbete där en 3D-modell av perlit bestående av ferrit och cementit skapades från 260 2D-snitt. Sedan dess har 3D-visualisering av mikrostrukturer behandlats ingående [1-16]. Detta område kan numera utforskas experimentellt genom datorstödd tomografi (3D-CT). Lyckade visualiseringar av såväl porositeter som grafitmorfologier har genomförts [eget arbete]. Användningen av tomografi förutsätter lämplig upplösning, exempel kräver porokarakterisering en upplösning på 6 µm. Denna kunskap bygger på ovannämnda bidrag till forskningen.

Referenser

- Bäckerdud, S. U.S. Patent No. 5328502. (n.d.). Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- R.V. Sillén Production of ductile iron castings without feeders Foundry Trade J, 180 (2007), pp. 147–150
- <http://www2.sintercast.com/file/200431721250559afs-paper-2.pdf> accessed 2017-03-31
- SHOLAPURWALLA A., SCOTT S.. *Capturing the Complexities of Ductile Iron Solidification Through Simulation* AFS Transactions 2008. American Foundryman Society Paper 08-129(01).
- Heisser C, Sturm J C. Casting Process Simulation of Compacted Graphite Iron (03-025), AFS Trans., 2003, 111: 25-31.
- T. Skaland, Ø. Grong, T. Grong. A model for the graphite formation in ductile. Metallurgical Transactions A October 1993, Volume 24, Issue 10, pp 2347-2353
- A. Diószegi, J. Elfsberg, Z. Diószegi: Solubility of Hydrogen and Nitrogen in liquid cast iron during melting and mold filling. Proceedings of the 72nd World Foundry Congress, 21-25th May 2016, Nagoya, Japan. Based on results from SPOFIC. Awarded with the best conference paper award.
- Larranaga P, Gutierrez J M, Loizaga A, Sertucha J, Suarez R A Computer-Aided System for Melt Quality and Shrinkage Propensity Evaluation Based on the Solidification Process of Ductile Iron *Transactions of American Foundry Society, Volume 116, Pages 547-562, 2008*
- Hillert, M. The formation of pearlite. In: Zackay, V. F., Aaronson, H. I.(Eds.). *Decomposition of Austenite by Diffusional Processes*. Interscience Publishers, Inc / John Wiley & Sons, 1962. 691 p.
1. R.W. Heine, C.R. Loper, On dendrites and eutectic cells in gray iron. AFS Trans. 77, 185–191 (1969)
 2. K.R. Olen, R.W. Heine, A revision of the Fe-C-Si system. Cast Met. Res. J. 4(1), 28–43 (1968)
 3. G.L. Rivera et al., Examination of the solidification macrostructure of spheroidal and flake graphite cast irons using DAAS and EBSD. Mater. Charact. 59, 1342–1348 (2008)
 4. A. Diószegi, L. Elmquist, S. Adolfsson, Characterizing shrinkage porosity in gray cast iron using microstructure investigation. AFSTrans. 105, 691–703 (2008)
 5. L. Elmquist, A. Diószegi, On the problems of a migrating hotspot. Mater. Sci. Forum 649, 443–448 (2010)
 6. R. Lora, A. Diószegi, Dynamic coarsening of 3.3C–1.9Si gray cast iron. Metall. Mater. Trans. A 43(13), 5165–5172 (2012)
 7. V. Fourlakidis, A. Diószegi, A generic model to predict the ultimate tensile strength in pearlitic lamellar graphite iron. Mater.Sci. Eng. A 618, 161–167 (2014)

8. P.K. Basutkar, S.A. Yew, C.R. Loper, Effect of certain additions to the melt on the as-cast dendritic microstructure of gray cast iron. *AFS Trans.* 77, 321–328 (1969)
9. J.M. Motz, Microsegregation an easily unnoticed influencing variable in the structural description of cast materials. *Pract. Metallogr.* 25, 285–293 (1988)
10. S.M.A. Boutorabi, J. Campbell, An etching technique for primary austenite dendrites in ductile cast iron. *Mater. Charact.* 31, 127–132 (1993)
11. G.L. Rivera, R.E. Boeri, J.A. Sikora, Revealing the solidification structure of cast iron. *Cast Met.* 8(1), 1–5 (1995)
12. S. Vazehrad, Study of microstructure and silicon segregation in cast iron using color etching and electron microprobe analysis. *Mater. Charact.* 104, 132–138 (2015)
13. R. Lora, A. Diószegi, L. Elmquist, Solidification study of gray cast iron in a resistance furnace. *Key Eng. Mater.* 457, 108–113 (2010)
14. S. Vazehrad, J. Elfsberg, A. Diószegi, On factors influencing macro shrinkage porosity formation in compacted graphite iron. *Mater. Sci. Forum.* 740, 429–434 (2014)
15. A. Diószegi, V. Fourlakidis, R. Lora, Austenite dendrite morphology in lamellar graphite iron. *Int. J. Cast Met. Res.* (2015).
16. A. Hultgren, Y. Lindblom, E. Rudberg, Eutectic solidification in grey, white, and mottled hypoeutectic cast irons. *J. Iron Steel Inst.* 176, 365–374 (1954).

8 Slutsatser och fortsatt forskning

Det går att framställa CGI-material som uppfyller kraven i relevanta standarder genom omsmältning av överbehandlat segjärn under väl kontrollerade förhållanden.

Dilatometermätningarna av järnlegeringars densitet som funktion av temperaturen visar att temperaturberoendet i smälta respektive austenit inte beror av kolhalt.

Genom att kombinera resultat med EPMA med provets stelningskurva (från släckningsexperimenten) kan det avgöras när under stelningsförloppet en enskild por har bildats.

Resultat från den utvecklade utrustningen antyder att kärnbildning av den eutektiska fasen inträffar under undertryck i interdendritiska områden samt att främmande faser (annan än eutektisk fas) utskiljs mot slutet av stelningsförloppet under övertryck i interdendritiska områden.

Preliminära resultat antyder att krympporositeter kan detekteras med ultraljud. Vidare antyder de preliminära resultaten att det är störst risk för porbildning vid hög magnesiumtillsats kombinerat med låg ympning.

Som tidigare nämnts bedrevs projekten *CastDesign* (2013-03303) och *VastIron* (2014-0199), bedrevs parallellt med *SPOFIC II*. Forskningsframstegen inom de båda projekten har många beröringspunkter och de deltagande forskarna har haft ett mycket väl fungerande samarbete vilket underlättande och påskyndande respektive delprojekt. De frågeställningar som kvarstår är i stor utsträckning gemensamma och planeras att behandlas inom framtida projekt.

Intrassanta områden att behandla inom framtida projekt:

Metoden utvecklad i del A bör användas samt kombineras med EPMA för att närmare studera segringsbeteenden i gjutjärnssorter.

Utrustningen som utvecklats inom del B kan nu användas för att genomföra parameterstudier. Exempelvis kan ympningens inverkan på struktur och defektbildning studeras mer systematisk än tidigare.

De genomförda dilatometermätningarna bör följas upp med fortsatta undersökningar av järnsmältors termofysikaliska egenskaper, exempelvis viskositet och ytspänning.

Mekanismen för den förgrovnig av dendriter som observeras inuti vissa porer bör klarläggas.

Det kan även tilläggas att de metoder och verktyg som har utvecklats är väl lämpade för att ingående studera exempelvis inverkan av olika legeringstillsatser på järnlegeringars struktur, defektbildning och egenskaper.

9 Deltagande parter och kontaktpersoner

Scania CV AB – Jessica Elfsberg

Volvo Group Trucks Operation – Zoltan Diószegi

Volvo Group Trucks Technology – Pål Schmidt

SinterCast AB – Elin Nilsson

Swerea Swecast AB – Henrik Borgström, Vasilios Fourlakidis

Jönköping University – Attila Diószegi, Björn Domeij, Kristina Hellström, Peter Svidró

Corr-control – Kaj Grönlund