

Kvantificering af efterfødnings effekter ved punkt-fødning af SG-jern støbt i vertikalt delte forme

N.K. Vedel-Smith, N.S. Tiedje, Danmark Tekniske Universitet, Kgs. Lyngby, Danmark
J. Sällström, FOSECO AB, Åmål, Sverige
K.T. Maza, Vald.Birn A/S, Holstebro, Danmark
Copyright 2012 American Foundry Society

Introduktion

I takt med at energiprisen stiger, og vil fortsætte med at stige i de kommende år, bliver det mere og mere vigtigt for støberierne at minimere den mængde metal der skal smeltes for at sikre konkurrenceevnen. Det er vist, at der kan opnås store besparelser på både råmaterialer, energi og penge ved forbedrede efterfødningsmetoder¹. Ordentlig efterfødnings af godset giver forbedret udbytte, hvilket igen giver reduceret energiforbrug til smeltning, og derved bedre indtjening.

Mens der måske er mulighed for at hente små forbedringer på traditionelle efterfødere, så kan der opnås store forbedringer ved at benytte nye tilgange til efterfødnings. Nye muligheder for efterfødnings giver konstruktørerne i støberiernes metodeafdelinger mulighed for at støbe kompliceret gods med profit.

Punkt-efterfødere, til vertikalt delte forme, muliggør efterfødnings af områder der er placeret væk fra skillelinjen, i stil med den placering der kendes fra horisontalt delte forme. Efterføder sleevesne er lavet af enten isolerende eller eksotermisk materiale, eller en kombination af de to. Ligesom almindelige efterfødere tilfører de varme og smelte til det valgte område, hvorved den overordnede varmfordeling i godset ændres så det størkner med retning mod efterføderen.

Denne artikel er resultatet af et projekt udført i et samarbejde mellem DTU Mekanik, Vald. Birn Jernstøberi, DISA Industries og

FOSECO. Projektets mål er at karakterisere, kvantificere og forstå effekten af forskellige efterføderløsninger.

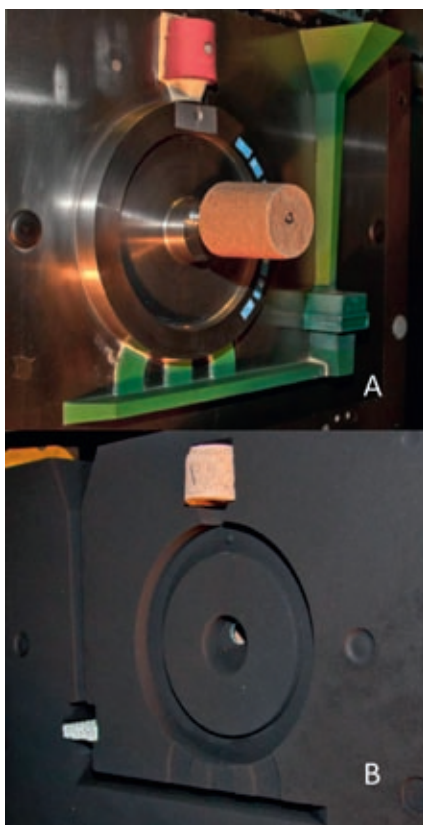
Ram-Up Sleeves

Punkt-efterføderen er formet direkte ind i sandbollen via et såkaldt ram-up sleeve system. Traditionelt bliver sleeveen sat ind i

formen i skillelinjen, enten manuelt eller med en kerneilægger. Ram-up sleeves bliver monteret på en specielt designet pind (holder) på selve formpladen, som så holder sleeveen på plads under opformning. Pinden monteres på modellen dér hvor efterføderen skal have forbindelse til godset. Se figur 1.

Ram-up sleeveen har en sammenklappelig krave som muliggør at geometrien ved efterføderens hals folder sammen under pressningen af formen, hvorved sandet mellem efterføder og model kompakteres og selve sleeveen beskyttes mod at blive knust.

Løsningen med ram-up pinden muliggør at efterfødere kan placeres væk fra formens skillelinje, hvorved det bliver muligt at punkt-føde med vertikalt delte forme. Den eneste store restriktion er at pinden skal være på linje med presseretningen.



Figur 1. A) Formplade med indløbssystem (grøn), top-efterfødergeometri (rød), støbegeometrien og pind med ram-up sleeve (i midten). B) Opformet sandbolle med ram-up sleeve til punkt-efterfødnings (i midten), keramisk filter og top-efterføder sleeve.

Ekspérimentielt Setup

STØBEGEOMETRIEN

Den benyttede testgeometri består af en skive med et nav på midten samt en ydre ring, adskilt af en tynd plade-lignende sektion. Geometrien er designet til at demonstrere den type efterfødningsproblemer som findes i bl.a. bremseskiver, svinghjul og lign. gods med svære sektioner med høj modul adskilt fra den almindelige efterfødningsvej af en tyndvægget sektion med lille modul. Se figur 2. Støbegeometriens dimensioner findes i tabel 1 sammen med de

forskellige sektioners geometriske modul samt efterfødningsmodul.

$$M_f = 1,2 \cdot M_g$$

Lig. 1

hvor M_g er sektionens geometriske modul udregnet som volumen divideret med den kølende overfalde².

Tabel 1. Støbegeometriens dimensioner [mm] og moduler [cm]. Snitoverblik i figur 3.

	III	IV	V	VI	VII
Højde	25	55	50	55	25
Tykkelse	20	10	30	10	20
Modul	0,6	0,5	0,9	0,5	0,6
Efterfødningsmodul	0,7	0,6	1,1	0,6	0,7

Støbetappen, skumrenden og indløbet er alle af konventionelt design. Et 10 PPI* keramisk skumfilter blev placeret nederst på støbetappen for at reducere turbulens og luftindeslutninger i smelten. Se figur 1.

Emnet har en udstøbningsvægt på ca. 4 kg og selve støbningen vejer 8 kg.

Legeringer

To forskellige legeringer blev undersøgt i forøget. Den første legering var en traditionel EN-GJS-500-73 (benævnt α i resten af artiklen) som er almindeligt anvendt til en lang række produkter og som kun har en lille tendens til svind. Den anden legering var en EN-GJS-450-103 (benævnt β i resten af artiklen) med højt siliciumindhold, Si, hvilket giver en næsten fuldt ferritisk struktur med forbedret brudforlængelse og bearbejdighed. Legeringernes kemiske sammensætning findes i tabel 2.

Det lavere kulstofindhold, C, og højere Si-indhold i EN-GJS-450-10 (β) gør at denne legering har større tendens til svind og deraf porøsitetsdefekter.

Begge legeringer er nær-eutektiske og kan derfor forventes at størkne med næsten struktur, men

* Pores Per Inch (Pore per tomme)

Tabel 2. Legeringssammensætning [wt%]

	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
EN-GJS-500-7 (α)	3,67	2,73	0,50	0,015	0,005	0,049	0,025
EN-GJS-450-10 (β)	3,35	3,48	0,34	0,017	0,003	0,046	0,010

i temperaturintervallet 800 °C til 500 °C er de to legeringer forskellige på den måde at α -legeringen vil danne perlit mens det normalt ikke sker i β -legeringen.

En anden stor forskel mellem de to legeringer er det højere C indhold og deraf følgende større grafitekspansion for α -legeringen.

Efterfødersleeves

Forsøgets design med brug af sleeve gjorde det muligt at ændre det termiske (eller sande) modul (M_t) af efterføderne uden at ændre på det geometriske modul (M_g).

$$M_g = \frac{V}{A}$$

Lig. 2

Sleevematerialet giver en såkaldt moduludvidelsesfaktor, eller på engelsk Modulus Extension Factor² (MEF) som er materialespecifik. MEF'en er et tillæg til den geometriske modul af efterføderen, og bestemmes af sleeveens ma-

teriale og geometri – fx tykkelsen på sleeveen.

Alle de i forsøget benyttede efterfødere har samme geometriske modul, og de kan derfor ikke sammenlignes alene på baggrund af dette. I stedet sammenlignes efterføderne ud fra deres termiske modul².

$$M_t = MEF \cdot M_gE$$

Lig. 3

Placering af efterføder

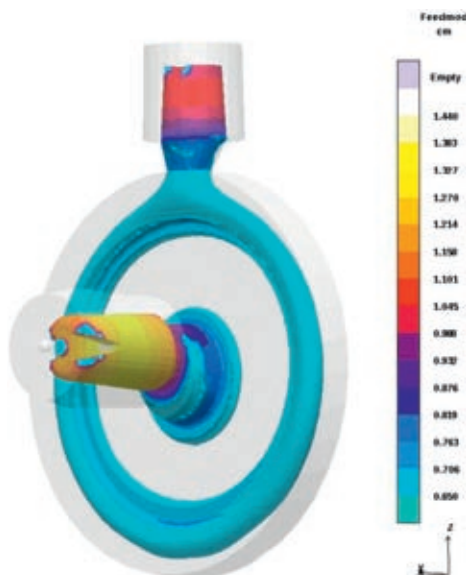
Støbegeometrien er designet med to efterfødere – 1) en topefterføder placeret på toppen af den ydre ring ved formens skillelinje, og 2) en centerefterføder placeret væk fra skillelinjen ved brug af ram-up sleeve systemet. De benyttede topefterfødersleeves var enten lavet af isolerende (M_t 0,9 cm) eller en blanding af eksotermisk og isolerende materiale (M_t 1,0 cm). Sleeve materialet til centerefterføderen var enten isolerende (M_t 1,1 cm), en blanding af eksotermisk og isolerende med samme modul (M_t 1,1 cm), eller rent eksotermisk (M_t 1,2 cm).

Kombinationer af efterfødere

Forsøget omfattede 18 forskellige kombinationer af efterfødere og legeringer. Denne artikel fokuserer på resultaterne fra 8 af disse kombinationer. Hver kombination blev støbt i 3 eksemplarer for at kunne efterprøve reproducerbarheden af resultaterne. De 8 kombinationer er systematisk navngivet $\alpha 1$ til $\alpha 5$ for EN-GJS-500-7 legeringen, og $\beta 1$ til $\beta 3$ for EN-GJS-450-10 legeringen. De 3 duplikater er hver i sær navngivet som enten A, B eller C.

Emnerne $\alpha 1-5$ blev støbt med EN-GJS-500-7 legeringen, hvori $\beta 1-3$ blev støbt med EN-GJS-450-7 legeringen.

De undersøgte kombinationer er vist i tabel 3. Kombinationerne er valgt for at give en bedre forståelse af de effekter som de forskel-



Figur 2. Efterfødningsmodul [cm] for støbegeometri. Den ydre ring og det indre nav har større modul end den mellemliggende sektion. Den højeste modul findes i efterføderne, hvoraf center efterføderen er den største.

	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	$\alpha 4$	$\alpha 5$	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$
Top	E/I	Iso	E/I	-	-	E/I	Iso	E/I
Center	Eks	Iso	-	E/I	-	Eks	Iso	-

Tabel 3. Efterføderkombinationer. Eks står for eksotermisk, Iso står for isolerende og E/I står for eksotermisk-isolerende.

lige efterføderere og sleeve materialer har, såvel som hvilken betydning fraværet af en eller begge efterfødere har på godset.

Støbeforhold

Forsøgene blev udført under produktionsforhold hos Vald.Birn Jernstøberi A/S i Holstebro. Forsøgsstøbningerne blev støbt på en vertikal formmaskine - en DISAMATIC 230A. Forsøgene blev støbt under to forskellige sessioner i hhv. juni 2011 og januar 2012. Begge sessioner benyttede den samme formmaskine med identisk opsætning.

Alle forsøg blev støbt med en opvarmet støbeautomat, således at smeltetemperaturen blev holdt konstant mellem udstøbningerne. Emnerne blev støbt i tre sekvenser, 1. og 2. sekvens i juni 2011 med EN-GJS-500-7 legeringen. 1. sekvens blev støbt ved 1401 ± 5 °C. 2. sekvens blev støbt inde for en time af 1. sekvens og blev støbt ved 1408 ± 5 °C. 3. sekvens blev støbt i januar 2013 med en EN-GJS-450-7 legering og støbt ved 1392 ± 5 °C. Den kemiske sammensætning vist i tabel 2 er bestemt med optiskemissionsspektroskopi. Fylde tiden for emnet var ca. 3,5 s.

Emnerne blev sorteret fra ved udslagningen for at bevare emnerne intakte med deres indløbssystem. Herefter blev emnerne rensset ved hjælp af stålhaglsrensning.

Penetranttest

Alle emner blev delt på midten, i den lodrette centerlinje, for at muliggøre en grundig undersøgelse af de mulige makro- og mikroporositeter så tæt på centerlinjen som

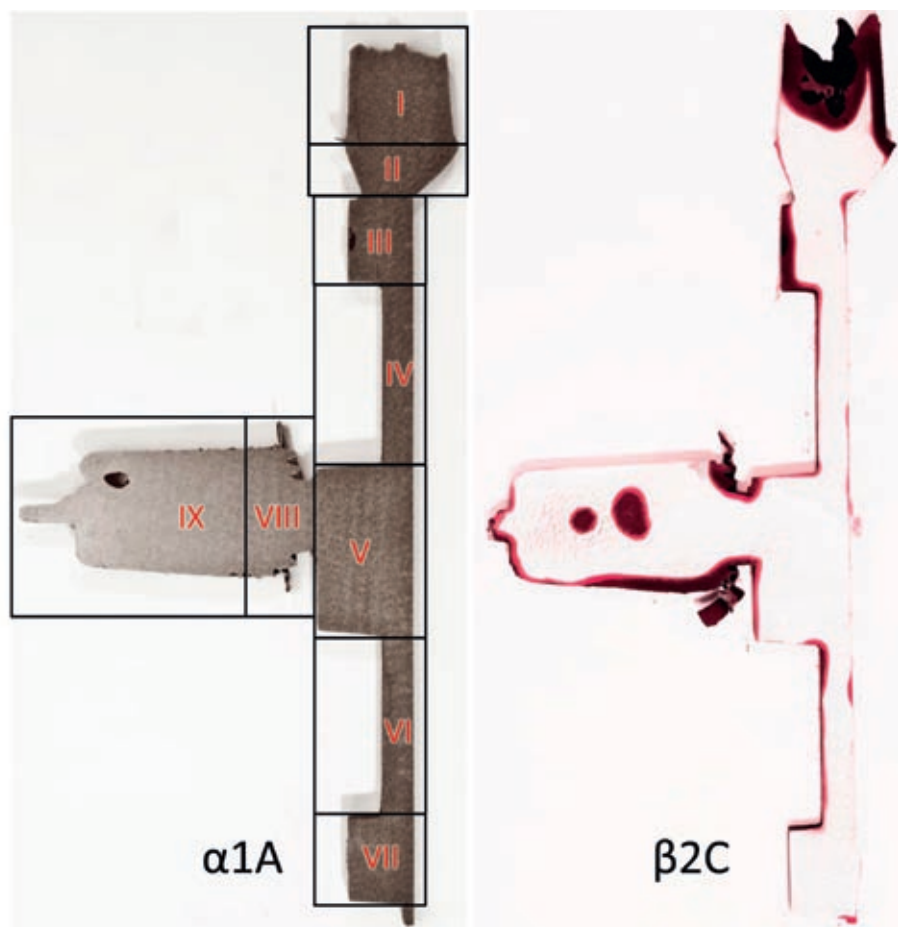
muligt. En 5 til 10 mm tyk skive blev skåret ud af hvert emne, og overfladen mod centrum blev derefter planslebet for at opnå en plan og glat overflade. Se figur 3. Efterfølgende blev skiverne ætset med oxalsyre, ca. 25 g og 500 ml vand pr. skive, ved stuetemperatur i 24 timer. Ætsningen af emnerne var for at fjerne det materiale som planslibningen måtte have tværet ud over overfladen, hvorved porositeterne kunne være blokerede, og resultatet dermed forvansket.

Skiverne blev først rensset grundigt, og derefter sprøjtet med farve-penetrant, hvorefter emnet hvilede i 5-10 min. Så blev skiverne rensset igen og til sidst sprøjtet med en fremkaldervæske.

Alle skiverne blev fotodokumenterede inden for 20 min. efter at de var blevet sprøjtet med fremkaldervæsken.

Penetranttesten blev udført i henhold til den europæiske standard EN 1371-1:2011. Ligeledes er den visuelle evaluering og klassifikation af porositeterne også udført i henhold til beskrivelsen i denne standard.

Hver af skiverne blev inddelt i 9 ikke-overlappende områder, som set på figur 3. Hvert enkelt område blev evalueret for størrelse og type af porositeter. Områderne med efterfødere og efterføderhalsene blev også evalueret. Porositeter er forventelige i selve efterføderne



Figur 3. Venstre: De 9 områder der er undersøgt for porositeter, her vist med emne $\alpha 1A$ for penetranttest. Højre: Resultatet af penetranttesten for emne $\beta 2C$. Område III er klassificeret som SP1 defekt, og område IX er klassificeret som CP3 defekt.

og har ingen indflydelse på kvaliteten af støbningen. Ligeledes har porøsiteter i efterføderhalsen ikke direkte betydning for kvaliteten af godset, men porøsiteter i disse områder indikerer at efterføderen er tæt på grænsen for sin formåen så man evt. skal vælge en efterføder med større modul.

Måling af overflade-deformation

Utilstrækkelig efterføding kan afstedkomme mere end porøsiteter inde i emnet, det kan også forårsage overfladeindsugninger. For at være i stand til at evaluere de forskellige efterføderkombinationers indflydelse på overfladeindsugninger og geometrisk stabilitet blev den plane bagside af alle støbningerne opmålt med en koordinatmålemaskine (KMM). KMMen opmåler bagsiden med en tast ud fra et måleprogram. En tast med en hoveddiameter på 3 mm blev anvendt for at sikre et tilstrækkeligt mekanisk filter overfor støbningens almindelige overfladeruhed. Det resulterende 3D-koordinatbillede blev derefter brugt til at evaluere fladheden af emnet. Fladhedsværdien (fV) er et simpelt mål for den største højdeforskel der forekommer på den målte overflade. En perfekt flad overflade har fx en fV på 0,000 mm.

Fladhedsværdien giver i sig selv ikke noget bevis for eksistensen af overfladeindsugninger. Støbeemner kan af forskellige årsager slå sig som en effekt af de spændinger der opbygges i godset under størkning, afkøling og udslagning. Overfladeindsugninger vil dog ofte optræde som lokale fordybninger af overfladen.

Numeriske simuleringer

Alle efterføderkombinationer er blevet simuleret og undersøgt ved brug af et simuleringssoftware – MAGMASOFT 5.2.

Simuleringsresultaterne blev brugt til at evaluere mængden og placeringen af porøsiteterne, og

derved få indblik i hvilke områder hvor der er størst tendens til at opstå porøsiteter. På den måde kan porøsiteter der ligger inde i godset, væk fra overfladerne og centerlinjen forudsiges. Simuleringen gav ydermere mulighed for at studere hvorledes porøsiteterne opstår og udvikles under størkningen, såvel som formindskes og til tider forsvinder igen pga. grafitekspansionen der kommer når godset afkøles. Analysen er foretaget ved at analysere simuleringen af hele størkneprocessen og at sammenligne disse resultater med de porøsiteter der er fundet i det gennemskårne gods.

Resultater

Emnerne blev evalueret ud fra flere parametre – porøsiteter, placeringen af porøsiteter og overfladeindsugninger – for korrekt at kunne identificere om emnerne kunne kvalificeres som fejlfri eller ej. Denne undersøgelse forsøger ikke at fastsætte standarder for hvilke defekter der kan tillades, og hvilke der ikke kan. Derfor går denne undersøgelse på at beskrive hvor porøsiteter findes og hvordan de er fordelt i emnerne. Den tilladte mængde og placering af defekter er meget funktionsafhængig og varierer derfor mellem forskellige typer af gods.

PORØSITETER

Defekterne blev klassificeret som enten ikke-lineære isolerede porøsiteter (SP) eller som ikke-lineære samlede porøsiteter (CP) iht. EN 1371-1:2011 (C, D).

Områderne II, IV og VI viste ikke tegn på defekter i nogle af de 24 støbninger. Område II er efterføderhalsen for top-efterføderen. Den har tilsyneladende tilstrækkeligt stort modul i alle kombinationerne. Områderne IV og VI er de tyndvæggede sektioner der adskiller centernavet fra den ydre ring. I emne $\beta 3C$ blev der fundet en SP1 defekt i område VII – den nederste ring. For alle andre af de 24 emner var dette område fri for defekter.

Derfor vil den videre analyse fokusere på områderne III, V og VIII, hvorved det er muligt at evaluere de forskellige efterføderkombinationers evne til at efterføde emnet.

Referenceemner

For at kunne kvantificere effekten af de forskellige efterfødere var det også nødvendigt at have referenceemner uden efterfødere. Emnegrupperne $\alpha 3$ og $\beta 3$ blev støbt uden center-efterføderen. Emnegruppe $\alpha 4$ blev støbt uden top-efterføderen, og emnegruppe $\alpha 5$ blev støbt helt uden efterfødere.

Emnegruppe $\alpha 3$ har SP1 eller CP1 defekter i område V. Emnegruppe $\alpha 4$ har SP1 defekter i område III. Emnerne $\alpha 5A$ og C har SP1 og CP1 defekter i område III og V, mens emne $\alpha 5B$ har en SP1 defekt in område III. Ingen af referenceemnerne er uden defekter. De 9 af referenceemnerne er støbt med EN-GJS-500-7 legeringen.

Emnegruppe $\beta 3$ er uden center-efterføder – præcis som emnegruppe $\alpha 3$ – men støbt med EN-GJS-450-7 legeringen. Alle 3 støbninger har defekter klassificeret som SP1, CP2 eller CP3 i områderne III og V. Alle tre kopier af referenceemnerne har defekter.

EN-GJS-500-7 emnerne

Emnegrupperne $\alpha 1$ og $\alpha 2$ blev støbt med EN-GJS-500-7 legeringen. I den legering dannes relativt meget grafit under størkning. Vedrørende de tre områder i fokus, så er der for alle seks emner kun fundet defekter i område VIII. Område VIII er efterføderhalsen for center-efterføderen og et enkelt emne – $\alpha 2B$ – havde en SP1 defekt her.

EN-GJS-450-10 emnerne

Emnegrupperne $\beta 1$ og $\beta 2$ var forsynet med de samme efterfødere som emnerne $\alpha 1$ og $\alpha 2$ hver for sig, men støbt med EN-GJS-450-10 legeringen. Mens emnegruppe $\alpha 1$ ikke havde nogle defekter i nogen af områderne, så havde emne $\beta 2A$ en SP1 defekt i område VIII. Emne $\beta 2B$ havde en SP2 defekt i område V og en SP1 defekt i område VIII.

Endelig havde emne $\beta 2C$ en SP1 defekt i område III.

Resultaterne af penetranttesten er opsummeret i tabel 4.

Overfladedeformation

Ud af de 24 emner har de 20 en fladhedsværdi mellem 0,33 og 0,53 mm. Den største forskel findes mellem emnerne $\alpha 1B$ og $\alpha 2B$ og er på 0,2 mm. Emnegruppe $\alpha 5$ har et langt større fV område fra 0,82 til 0,97 mm. Emnegruppe $\alpha 3$ og $\alpha 4$ har sammenlignelige fladhedsværdier selvom de enten mangler top- eller centerefterføderen. Fraværet af begge efterfødere fordobler omtrent den højdeforskel der måles på tværs af overfladen, sammenlignet med alle de andre emner. Se figur 5.

Som vist i figur 5 så er der visse forskelle i fladheden af emnerne som kan spores tilbage til brugen af efterfødere for det enkelte emne. De eksotermiske efterfødere i emnegruppe $\alpha 1$ har en fV der er ca. 25 % større end den rent isolerende efterføder benyttet til emnegruppe $\alpha 2$. Samme effekt ses ikke for EN-GJS-450-10 legeringen hvor fV varierer mellem 0,39 og 0,41 mm.

Fladhedsværdien kan dog ikke relateres direkte til overfladeindsugninger. Variationen i højdeforskellene på tværs af emnets overflade kan relateres til at godset slår sig pga. varmespændinger som opstår under afkølingen af emnet. Se figur 4. Alle emnerne viser tegn på at slå sig. Det er ikke muligt med de forhåndenværende data at konkludere hvor stor en del af overfladens ujævnhed som skyldes overfladeindsugninger. For nogle emner, som fx $\alpha 4A$, er der en dal tæt ved navet, hvori- mod andre emner, fx $\beta 1A$, har en dal der dækker langt større del af den midterste sektion af emnet.

Simuleringer

Porositetsanalyse

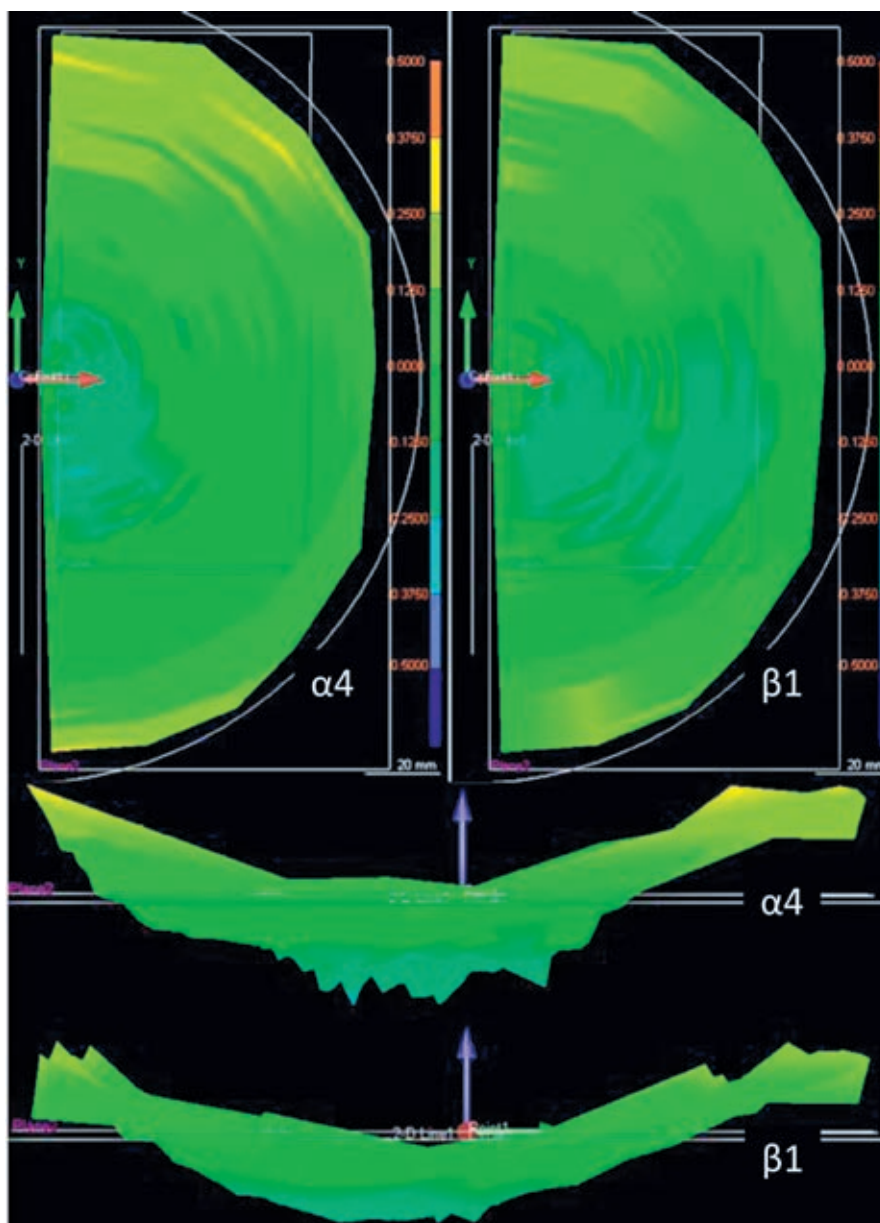
Analyser af dannelsen af porøsiteter under størkning viser at den primære forskel mellem de to legeringer er den bedre genudvidelse

for EN-GJS-500-7 legeringen. Dette var forventet idet EN-GJS-500-7 har et højere indhold af C og dermed et større grafitekspansions sammenlignet med EN-GJS-450-10.

Simuleringer viser, at der er nogle få områder der sandsynligvis indeholder små porøsiteter. De eksotermiske efterfødere har områder med intensive porøsiteter angivet med rød og gul farve i figur 6- $\alpha 1$. De isolerede efterfødere viser områder med mulige porøsi-

teter, men i mindre skala end de eksotermiske efterfødere, som vist på figur 6- $\alpha 2$.

Ændringen i legerings sammensætning påvirkede også størrelsen og placeringen af porøsiteterne. EN-GJS-450-10 legeringen viste en øget tendens til porøsiteter sammenlignet med EN-GJS-500-7, ved brug af den samme grafitekspansionsfaktor. En-GJS-500-7 er simuleret med en grafitekspansionsfaktor på 8. Ved at simulere en række forskellige grafitekspansi-



Figur 4. Fladheden af emnerne $\alpha 4A$ og $\beta 1A$. Halvdelen af emnerne ses her hhv. lige på og fra siden. Alle fire opstillinger benytter samme skala. 0,00 er middelværdien og farveskalaen dækker $\pm 0,50$ mm. Vær opmærksom på at krængningseffekten som ses for begge emner, er stor nok til at skjule en eventuel overfladeindsugning.

onsfaktorer for EN-GJS-450-10 og efterfølgende sammenligne disse med resultaterne fra penetranttesten, blev det bestemt at den bedst matchende grafitekspansionsfaktor ligger mellem 6 og 7. Se figur 6- $\beta 1+\beta 2$.

De termiske gradienter frembragt af de forskellige typer af efterfødersleeves viser tydeligt at de eksotermiske og eksotermisk-isolerende sleeves har et markant højere modul sammenlignet med den rent isolerende sleeves. Se figur 7.

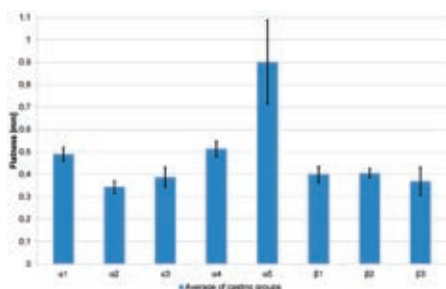
Diskussion

Porøsiteter

EN-GJS-500-7

Analysen af porøsiteterne i emnerne viste at der næsten ingen defekter var i emnegrupperne $\alpha 1$ og $\alpha 2$. Den ene defekt som blev identificeret i disse 9 emner blev fundet i støbning $\alpha 2B$ område VIII og klassificeret som SP1. Det var en meget lille ikke-lineær porøsitet i selve efterføderhalsen ved centerefterføderen. Så, alle 9 emner var sunde iht. alle kategorierne angivet i EN 1371-1:2011.

Hvis ovenstående resultater sammenlignes med emnegrupperne $\alpha 3$, $\alpha 4$ og $\alpha 5$, som alle er støbt med den samme legering, men støbt uden en eller begge efterfødere, så havde disse emner alle sammen porøsiteter af typen SP1 eller CP1 i de samme områder. Idet støbeemnet er designet til at skabe denne type af defekter er det ikke en stor overraskelse, men påviser at begge typer af efterfødersleeves, hhv. eksotermiske



Figur 5. Fladhedsværdi (fV) i gennemsnit for hver emnegruppe angivet med 95 % konfidens T-interval, angivet med fejløjler.

og isolerende, skabte den påkrævede efterfødnings for at emnerne kunne produceres uden defekter. Punkt-efterføderne leverer både tilstrækkeligt smelte, varme og tryk til at emnerne kunne støbes uden porøsiteter.

Emnegruppe $\alpha 4$ – med center-efterføder men uden topefterføder – viste ikke tegn på defekter i område V, men SP1 defekter i område III. Dette er i tråd med intentionen i designet af støbeemnet. På sammen måde viste emnegruppe $\alpha 5$ SP1 eller CP1 defekter i både område III og V. Eneste undtagelse er $\alpha 5B$ område V som er fri for porøsiteter.

EN-GJS-450-10

EN-GJS-450-10 legeringen der havde et højere indhold af Si og lavere indhold af C havde større tendens til at danne porøsiteter sammenlignet med EN-GJS-500-7 legeringen. Kun emnegruppe $\beta 1$ var fri for defekter. Emnegruppe $\beta 1$ benyttede en eksotermisk-isolerende top efterføder og en eksotermisk centerefterføder. Emnegruppe $\beta 2$ viste defekter, om end i forskellige udstrækning. $\beta 2A$ havde en SP1 defekt i område VIII – i efterføderhalsen til centerefterføderen – men emnet er ellers defektfrit inde i selve godset. Denne defekt er sammenlignelig med samme område for $\alpha 2B$ som blev støbt med nøjagtig den samme efterføderkonfiguration. Forskellen

er, at hvor $\alpha 2B$ havde den eneste defekt for hele sin emnegruppe, så er $\beta 2A$ det eneste emne i sin gruppe som ikke har porøsiteter i selve godset. En-GJS-450-10 legeringen har dermed påvist at der er en funktionel forskel mellem de isolerende og de eksotermiske efterfødere, hvor den udvidede Mt for de eksotermiske efterfødere gjorde hele forskellen.

Endelig, som en reference til emnegruppe $\alpha 3$, testede emnegruppe $\beta 3$ effekten af fraværet af en centerefterføder for EN-GJS-450-10 legeringen. Ligesom med $\alpha 3$ var det område V der blev påvirket. Graden af defekter er dog større for EN-GJS-450-10 legeringen end den er for EN-GJS-500-7 legeringen.

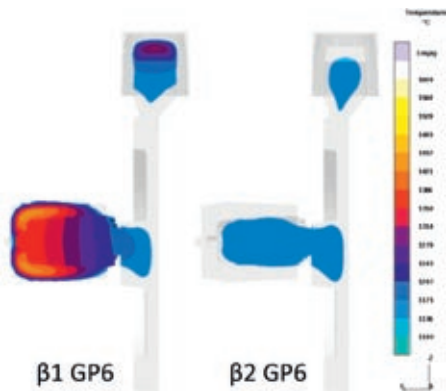
Mulige procesfejl

Porøsiteter kan lige så godt være lokaliserede 5 mm væk fra støbeemnets centerlinje, som de kan være lige præcis der hvor emnet er blevet gennemskåret. Det er derfor ikke muligt med sikkerhed at påvise, at der ikke er porøsiteter liggende under overfladen.

Penetranttesten er udført med planslebne og ætsede emner for at minimere effekten af den mekaniske bearbejdning af emnet ifm. gennemskæringen. Det er derfor usandsynligt at denne proces har skjult porøsiteter eller på anden måde påvirket analyseresultaterne.



Figur 6. Simulering af porøsiteter i emnegrupperne $\alpha 1$, $\alpha 2$, $\beta 1$ og $\beta 2$. 3D modellen er gennemskåret på midten i den vertikale symmetriakse, på samme måde som de støbte emner var blevet. Simuleringen af $\alpha 1$ og $\alpha 2$ benytter en grafitekspansionsfaktor på 8, mens simuleringen af $\beta 1$ og $\beta 2$ benytter en grafitekspansionsfaktor på 6.



Figur 7. Simulering af temperaturfordeling ved emnets vertikale symmetriakse inklusiv efterfødersleeve. Sammenligning af eksotermisk efterfødersleeve β1 (venstre) med isolerende efterfødersleeve β2 (højre). Begge simuleringer er ved 85 % størknet.

Det er muligt at meget små defekter ikke er blevet opdaget pga. den tid det tog at fotodokumentere emnerne, frem for en umid-

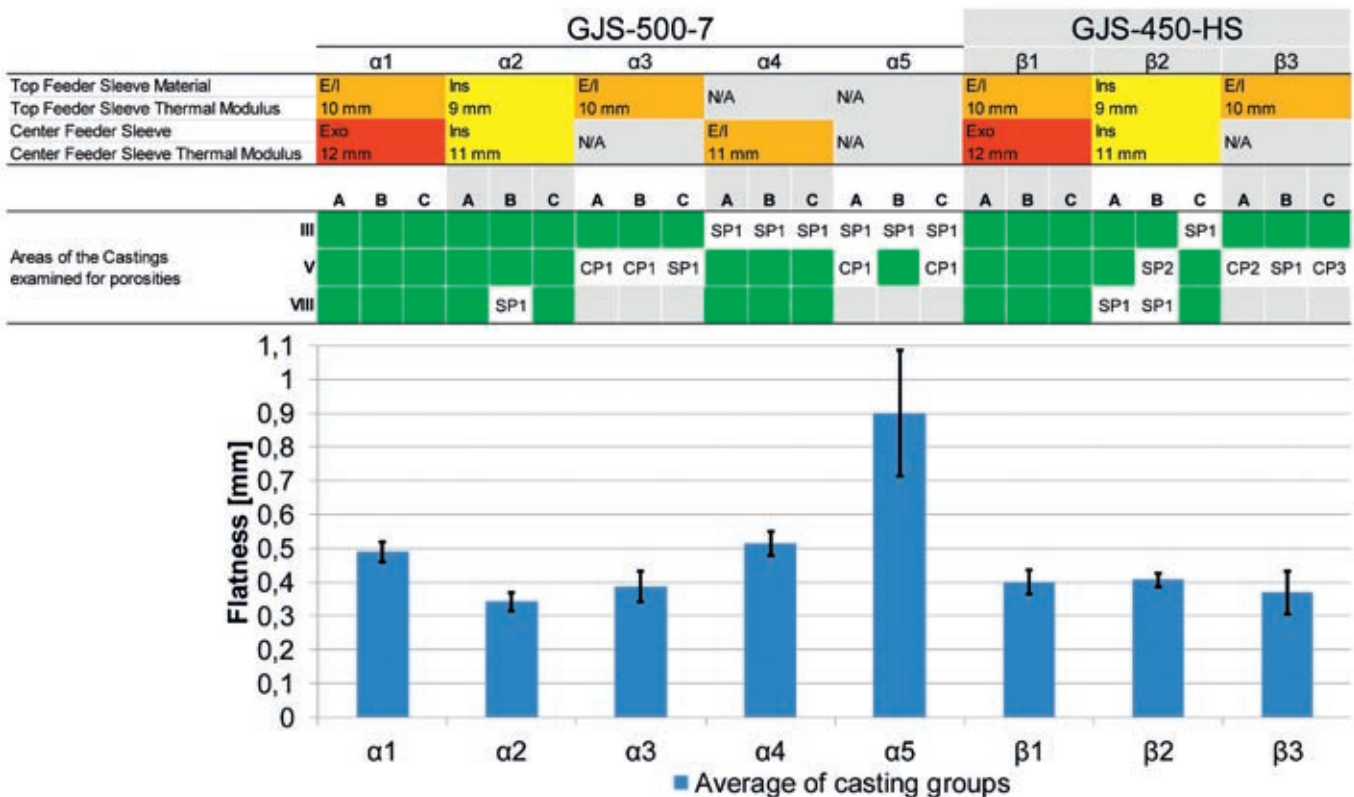
delbar analyse af emner lige efter påføringen af fremkalderen. Denne fremgangsmåde ville have muliggjort brugen af optisk forstørrelse op til x3 til undersøgelse af emnerne, iht. EN 1371-1:2011. Selvom det ikke kan udelukkes helt at flere defekter ville være fundet ved optisk forstørrelse, så ville alle disse defekter have været mikroskopiske og langt uden for detektionsområdet for hhv. røntgen- og ultralydsundersøgelser. På den anden side har digitaliseringen af prøveresultaterne gjort det muligt at benytte forskellige digitale filtre til at fremhæve forskellige egenskaber ved billederne og dermed at sikre optimal visning af emnerne under analysen. Ydermere tillader digitaliseringen af emnerne at analysen strækkes over et længere tidsinterval og at flere personer uafhængigt af hinanden kan analysere og klassificere resultaterne.

Endelig var der farven på siden af emnerne, som i nogen tilfælde

ikke blev fjernet helt under renseprocessen. Det betød at farven fra kanterne langsomt spredte sig ind på selve emnet, således at det blev rødt i kanterne. Igenem hele analysearbejdet er disse falske positive markeringer blevet udeladt fra resultaterne, men det er muligt at små porøsiteter som normalt ville være blevet opdaget, alligevel er blevet skjult af disse falske positive. Porøsiteterne dannes dog med stor sandsynlighed i midten af emnet, hvorved det er usandsynligt at farven fra kanterne dækker over defekter som ellers ville være opdaget. For de mindste sektioner er det dog muligt at farvningen fra kanterne har nået områder med porøsiteter da afstanden fra kant til centrum er relativt lille for disse sektioner.

Simulering af porøsiteter

Analysen af porøsitetsdannelsen under størkning viste at centerlinjen er det mest sandsynlige sted at finde porøsiteter for netop



Tabel 4. Samlede resultater til sammenligning af effekten ved forskellige efterfødersleeve materialer (og moduler) med hhv. type og størrelse af porøsiteter fundet med penetranttesten, såvel som fladhedsværdien fra KMM-målingerne. Resultaterne fra begge legeringer er vis. Exo = eksotermisk, Ins = isolerende og E/I = eksotermisk-isolerende.

denne støbegeometri. Selvom porositeter kan blive dannet væk fra centerlinjen, så viste simuleringen også, at hvis der var porositeter lokaliserede væk fra centerlinjen, så ville de med overvejende sandsynlighed være så små at de ikke ville kunne findes med hverken røntgen- eller ultralydsanalyser. Særligt den nederste del af den ydre ring kunne være tilbøjelig til at danne porositeter væk fra centerlinjen. Simuleringen viste generelt god sammenhæng mellem størrelse og placering af porositeterne som blev identificeret med penetranttesten.

Analysen af de termiske gradienter, som relaterer sig til de forskellige typer af efterfødersleeves, viste at de eksotermiske efterfødersleeves ikke kun holder sig selv og smelten varme i længere tid, de er med til at øge temperaturen i efterføderen, hvorved der opnås en stejlere temperaturgradient mellem efterføder og gods, end den som opnås med de isolerende efterfødere.

Overfladedeformation

Deformationen af overfladen på bagsiden af støbningerne forventes at have to forskellige oprindelser: 1) svind på overfladen som stammer fra volumensvindt under størkning og afkøling, og 2) forvrængning af emnet skabt pga. opbyggede spændinger i godset som deformerer emnet under størkning og afkøling.

Reproducerbarhed

Målingerne viste stor reproducerbarhed mellem de forskellige emnegrupper som det ses af figur 5. Med et konfidensinterval på 95 % er der overlap mellem grupperne α_2 , α_3 , β_1 , β_2 og β_3 . Emnegrupperne α_1 og α_4 udviser en lille smule større deformation end de førnævnte grupper, men overlapper med hinanden. Den sidste emnegruppe - α_5 - er tydeligt anderledes end de andre grupper. Emnegruppe α_5 viser tydeligt tegn på overfladeindsynkning på bagsiden af navet, hvilket udgør det ekstra udsving i fladhedsværdien på en i forvejen forvrænget overflade.

Emnegruppe α_5 er de emner som er støbt helt uden efterfødere.

Efterføderinteraktion

Ved at sammenligne overfladeindsynkningen ved navet for emnegruppe α_5 med overfladedeformationen for de andre emnegrupper viser emnegrupperne α_3 og β_3 interessante resultater. Ingen af de to emnegrupper - α_3 og β_3 - udviser store tegn på overfladeindsynkning nær navet. Dette er interessant fordi disse to emnegrupper, ligesom emnegruppe α_5 , blev støbt uden centerefterføder. α_3 og β_3 er dog, modsat α_5 , støbt med en topefterføder hvilket er tilstrækkeligt til at ændre overfladeindsynkningen længere nede på emnet, og det på trods af den termiske adskillelse der forekommer pga. den tyndvæggede sektion imellem de to områder. Påvirkningen kan stamme fra ændringen i det ferrostatiske tryk som bliver forøget ved brugen af en topefterføder. Det vurderes at netop det øgede ferrostatiske tryk er den primære årsag til forskellen mellem de tre emnegrupper, om end flere tests er nødvendige for at kunne konkludere i hvilken udstrækning forskellen skyldes ændringer i den termiske gradient eller ændringer i det ferrostatiske tryk.

Det er ligeledes vigtigt at bemærke, at efterføderingen af navet stadigvæk er utilstrækkelig, om end en centerefterføder derfor ikke kan undgås hvis godset skal være frit for porositeter. Emnegruppe α_3 udviser store og mere omfattende interne porositeter ved navet, så en reduceret overfladeindsynkning sikrer ikke et porositetsfrit emne.

Konklusion

De eksperimentelle støbninger blev lavet med stor reproducerbarhed og påviser at ram-up efterfødere yder tilstrækkelig efterfødering til succesfuldt at efterfødere dette emne, som ellers ville blive kasseret.

Støbegeometrien blev støbt uden centerefterføderen som reference. Disse emner udviste porosi-

teter ved det centrale nav i alle tre tilfælde. For EN-GJS-500-7 legeringen med en normal grafitekspansion producerede alle kombinationer med to efterfødere sundt porositetsfrit gods. For emnerne støbt med den mere krævende EN-GJS-450-10 legering var det kun kombinationen med den store Mt eksotermiske centerefterføder og eksotermiske-isolerende topefterføder som viste sig at være tilstrækkelig. Kombinationen udelukkende med isolerende efterfødere resulterede kun i at et af tre emner var frit for porositeter i de kritiske områder.

Det er blevet påvist at topefterføderen havde indflydelse på størkningen i området omkring navet, også selvom navet var isoleret fra topefterføderen af en tyndvægget sektion. Ydermere er det blevet påvist at efterfødermodulet påvirker deformationen af emnet i en grad så det kan måles på fladheden af emnets bagside, men at overfladeindsynkningen pga. manglende efterfødering for de forskellige grupper var ubetydelig sammenlignet med den overordnede overfladedeformation af emnerne.

Anerkendelse

Tak til de danske PSO-midler som har været med til at finansiere projektet. Projektet består af et samarbejde mellem FOSECO Ltd., MAGMA GmbH, DISA Industries A/S, Vald.Birn A/S og Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Mekanisk Teknologi. Alle har deltaget i arbejdet og bidraget til de opnåede resultater som er præsenteret i nærværende artikel.

Referancer

- Tiedje, N.S., "Resource Savings by Optimising Process Conditions in Foundries", World Foundry Congress (2008)
- Brown, J.R., "Foseco Ferrous Foundryman's Handbook," Foseco International (2000) <http://www.ductile.org/didata/section12/12intro.htm> (September 2012)